



Master 2 SGT PREFALC
"CIENCIAS Y GESTION DE LATIERRA"
GEOLOGIA, RIESGOS Y GESTION DEL TERRITORIO
Dynamique des Systèmes Géologiques et Aléas

Pasantía de investigación 2010

***“ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE TRES CASQUETES
GLACIARES DEL ECUADOR “***

Por

Bolívar CÁCERES



Chimborazo (foto: Bolívar Cáceres)

Director: Dr. Bernard Francou



Resumen

El primer inventario sistemático de las coberturas glaciares del Ecuador fue realizado a principios de los años noventa, siendo necesaria la actualización sobre el conocimiento de la evolución de estas en relación con la reciente evolución de las condiciones climáticas a lo largo de los Andes Tropicales, y los riesgos asociados con potenciales erupciones que afectarían a estos casquetes. Con dicho objeto se actualizó el estudio para tres de las principales coberturas del Ecuador (Cotopaxi, Antisana, Chimborazo) y se determinó que estas se han reducido en promedio en un 38% durante 40 años. La cobertura glaciaria para el Ecuador al año 1997 fue de 60 km². Utilizando los datos medidos sobre el Cotopaxi que es el mejor estudiado se realizó una proyección sobre la cobertura total al año 2006 obteniéndose un valor de 48 Km². Dicha evaluación a futuro deberá ser confirmada con la realización de trabajos adicionales sobre las coberturas no estudiadas en el presente trabajo (Cayambe, Altar).

Abstract

The first systematic inventory of glacier coverage in Ecuador was performed in the early nineties. It is important to update the knowledge on the evolution and recent relationship with climatic conditions along the Tropical Andes and the risk associated with potential eruptions which will affect the ice covers. This study was conducted to update the information related to glacier coverage on three Ecuadorian volcanos (Cotopaxi, Antisana, Chimborazo). It was determined that the glacier coverage reduced by around 38% in average over 40 years. The Ecuadorean glacier coverage measured in 1997 corresponded to 60 km². Using the data obtained for Cotopaxi, which has been studied in detail, a projection on the glacier coverage to the year 2006 was performed and a value of 48 Km² was obtained. This evaluation should be confirmed with future studies which include other glaciers such as Cayambe and Altar.

Résumé

Le premier inventaire systématique des glaciers en Equateur a été réalisé au début des années quatre vingt dix. Il est important de mettre à jour les connaissances sur l'évolution des glaciers, la relation avec les conditions climatiques dans les Andes tropicales, et les risques potentiels associés aux éruptions volcaniques qui aura une incidence sur la couverture glaciaire. Cette étude présente une mise à jour des informations relatives aux glaciers sur trois volcans Equatoriens (Cotopaxi, Antisana et Chimborazo). Nous avons déterminé que les couvertures glaciaires ont été réduites d'environ 38% en moyenne en 40 ans. L'extension totale des glaciers équatoriens en 1997 correspondait à 60 km². Sur la base des données obtenues pour le Cotopaxi, qui a été étudié en détail, une projection de l'extension glaciaire pour l'année 2006 a été effectuée et présente une valeur de 48 km². Cette évaluation devrait être confirmée avec les études à venir, notamment sur les glaciers d'autres volcans comme le Cayambe et l'Altar.

AGRADECIMIENTOS

- Al Dr. Bernard Francou , por apoyar la realización del presente trabajo
- Al Dr. Ekkehard Jordan , por la colaboración para el trabajo de fotogrametría digital en el Instituto de Geografía de la Universidad de Heinrich Heine Duesseldorf (Alemania)
- A la Ing. Patricia Mothes por su colaboración para el trabajo de interpretación y medición de puntos de control en el Cotopaxi
- Al Ing. Luis Maisincho por su colaboración para los trabajos para la medición de los puntos de control
- Al Sr. Arturo Peñafiel por la colaboración para la medición de puntos sobre el Cotopaxi y Chimborazo
- Al Dr. Stefan Hastenrath por sus valiosos comentarios
- Al IRD por financiar la realización de la presente investigación
- Al IGM (Instituto Geográfico Militar) por facilitar la utilización de la base fotográfica
- Al IMAMHI por el apoyo prestado para el funcionamiento del Programa Glaciares Ecuador
- A la EMMAP-Q por facilitar la utilización de la base cartográfica del Antisana
- A la Dra. Tanya Cáceres por su apoyo para la culminación del presente trabajo
- A la Lcda. Cristina Guamanzara por su colaboración en la edición

INDICE GENERAL

1	Introducción: ¿por qué este estudio?	1
2	Contexto general de la glaciación en el Ecuador.....	2
2.1	Contexto geográfico	2
2.2	Contexto geológico.....	3
2.3	Contexto climático.....	6
2.4	Los glaciares del pasado según distintas fuentes: variaciones históricas	10
2.4.1	<i>Extensiones glaciares antes de la Pequeña edad de hielo (PEH)</i> 10	
2.4.2	<i>La pequeña edad de hielo</i>	11
2.5	Inventarios de los tipos de estudios efectuados:.....	13
2.6	Interés de realizar un inventario de los glaciares del Ecuador	17
3	Estado del conocimiento de los glaciares durante las últimas décadas	18
3.1	Variaciones de longitud y área	18
3.2	Variaciones del balance de masa	19
4	Inventarios de los glaciares en el Ecuador: estado del arte	23
4.1	Intentos parciales o completos de inventarios previos	23
4.2	Glaciares actualmente estudiados.....	26
5	Metodología de trabajo.....	28
6	Resultados.....	39
6.1	Volcán Cotopaxi	39
6.1.1	<i>Inventario actualizado foto 2006</i>	39
6.1.2	<i>Inventarios anteriores fotos 1976-1997</i>	43
6.2	Volcán Chimborazo	48
6.2.1	<i>Inventario actualizado foto 1997</i>	48
6.2.2	<i>Inventario anterior fotos 1962</i>	53
6.2.3	<i>Inventario proyectado al año 2006</i>	55
6.3	Antisana	56
6.3.1	<i>Inventario actualizado foto 1997</i>	56
6.3.2	<i>Inventario anterior fotos 1956</i>	59
6.3.3	<i>Inventario proyectado al año 2006</i>	61
6.4	Inventario nacional proyectado al año 2006.....	62
7	Discusión	63
7.1	Incertidumbre de los resultados.....	63
7.2	Posibles razones para el retroceso	64
8	Conclusiones.....	66
9	Recomendaciones	68
	Bibliografía.....	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Mapa de ubicación de las principales coberturas glaciares.....	3
Figura 2.2.	Esquema Geodinámico del margen activo Ecuatoriano. Collot et al. 2004...	4
Figura 2.3.	Arco Volcánico Ecuatoriano. Modificado de Hall et al. ,1991	5
Figura 2.4.	Delimitación de los Trópicos desde el punto de vista glaciológico, distribución de los mismos por país y ubicación de ITCZ (Después de Kaser,1998 ; Kaser et al.,1996).....	7
Figura 2.5.	Temperatura en los Andes tropicales 1939-1998. Vuille et al. 2000a	8
Figura 2.6.	Tren de precipitación periodo 1950-1994.Izquierda suma anual, derecha verano austral (diciembre, enero, febrero) .Modificado de Vuille et.al.2003	9

Figura 2.7. Estratigrafía de los Andes del Ecuador. Heine 1995 a, b.....	10
Figura 2.8. Evolución de la longitud desde la máxima extensión glacial (MGE) para cuatro glaciares de los Andes tropicales (Charquini, Akilpo, Meyer y Carihuayrazo a altas y bajas elevaciones respectivamente). Jomelli et al. 2009 In press.....	12
Figura 2.9. Fluctuaciones estimadas sobre la línea de equilibrio (ELA) estimadas utilizando el método del área promedio de acumulación (AAR). Jomelli et al.2009....	13
Figura 3.1. Evolución de la longitud y área de varios glaciares Tropicales en Sudamérica. Francou et al. 2007	19
Figura 3.2. Comparación esquemática del balance de masa en medianas latitudes, parte interior de los trópicos y parte externa de los trópicos. (Kaser et al., 1999)	20
Figura 3.3. Balance de masa acumulado para tres glaciares sudamericanos. Francou et al. 2007	21
Figura 3.4. Balance de masa Glaciar 15 del Antisana período 1994-2008	21
Figura 3.5. Relación entre el Balance de masa medido en el glaciar 15 del Antisana y el Índice MEI del Pacífico Ecuatorial. Modificado de Cáceres et al., 2006.....	22
Figura 3.6. Correlación entre el balance de masa, la temperatura superficial del mar, y la temperatura reanalizada a 500 hPa. Francou et al. 2004	23
Figura 4.1. Mapa del Chimborazo (Hans Meyer). Jordan et al., 2003	24
Figura 4.2. Mapa del Chimborazo. Sauer 1965	24
Figura 4.3. Inventario de los Glaciares del Antisana. Hastenrath 1981	25
Figura 4.4. Cartografía del glaciar 15 del Antisana.....	27
Figura 4.5. Cartografía del glaciar SW del Carihuayrazo	28
Figura 5.1. de los puntos de control medidos en el nevado Chimborazo. Cáceres 2003	29
Figura 5.2. Distribución de los puntos de conexión Gruber. Linder 2006	31
Figura 5.3. Visión general de una línea de análisis. Linder 2006.....	31
Figura 5.4. Puntos de control ingresados con sus respectivas coordenadas	32
Figura 5.5. Bloque de ajuste para el Nevado Chimborazo. Cáceres 2003	32
Figura 5.6. Aerotriangulación para el Nevado Chimborazo. Cáceres 2003	33
Figura 5.7. Interpolación TIN, volcán Cotopaxi año 1997.....	34
Figura 5.8. Ortofotografía para el Cotopaxi año1997	35
Figura 5.9. Evolución del Glaciar SW del Antisana. Cáceres 2007.....	36
Figura 5.10. Área promedio de acumulación para el glaciar 15 del Antisana Modificado de Cáceres et al. 2008	38
Figura 6.1. Cobertura areal para el Casquete del Cotopaxi año 2006	41
Figura 6.2. Cobertura areal para el Casquete del Cotopaxi año 2006	42
Figura 6.3. Ortofotografía para el casquete glaciar del Cotopaxi, año 2006.....	43
Figura 6.4. Comparación de las áreas glaciares del Cotopaxi entre 1976 y 1997	45
Figura 6.5. Comparación de las longitudes glaciares del Cotopaxi entre 1976 y 1997..	45
Figura 6.6. Comparación de las coberturas glaciares 1976-2006 para el volcán Cotopaxi. Cáceres, 2005; Jordan et. al., 2005, Cadier et al., 200;, Cáceres et al., 2008;	46
Figura 6.7. Ortofotografía para el volcán Cotopaxi para el año 1997	47
Figura 6.8. Evolución de los glaciares del Cotopaxi, períodos 1976-1997/1997-2006..	48
Figura 6.9. Evaluación Chimborazo año 1997	51
Figura 6.10. Mapa general del Casquete Glaciar del Chimborazo, año 1997	52
Figura 6.11. Ortofotografía para el volcán Chimborazo para el año 1997.....	53
Figura 6.12. Áreas para los glaciares del Chimborazo	54
Figura 6.13. Evolución de los glaciares del Chimborazo, período 1962-1997	55
Figura 6.14. Áreas para los glaciares del Antisana para el año 1997	58
Figura 6.15. Mapa general del Casquete Glaciar del Antisana, año 1997.....	59

Figura 6.16. Áreas para los glaciares del Antisana.....	60
Figura 6.17. Evolución de los glaciares del Antisana, período 1956-1997.....	61

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Secuencia glacial del Cuaternario, límites de las morrenas terminales, edades de los avances glaciares sobre los Andes del Ecuador. Heine 1995 b</i>	11
<i>Tabla 2.2. Resumen de los datos glaciológicos medidos sobre el Glaciar 15 del Antisana. Modificado de Cáceres et al., 2008.....</i>	13
<i>Tabla 2.3. Evolución del área para el glaciar 15 del Antisana</i>	15
<i>Tabla 2.4. Evolución de la longitud para el glaciar 15 del Antisana</i>	15
<i>Tabla 2.5. Evaluación Glaciar Sur Oeste del Carihuayrazo, período 1956-2007.....</i>	16
<i>Tabla 2.6. Evaluación Glaciar Los Crespos del Antisana, período 2004-2007</i>	16
<i>Tabla 2.7. Evaluaciones hidrológicas para dos cuencas del volcán Antisana</i>	17
<i>Tabla 4.1. Inventario de los glaciares del Ecuador. Jordan et al., 1999.....</i>	26
<i>Tabla 5.1. Resolución de las fotografías utilizadas. Linder 2009.....</i>	30
<i>Tabla 6.1. Evaluación Cotopaxi año 2006</i>	41
<i>Tabla 6.2. Áreas y Longitudes medidas para cada una de las lenguas del Glaciar del Cotopaxi entre 1976 y 1997. Cáceres 2003; Cáceres 2005; modificado Jordan 1983 .</i>	44
<i>Tabla 6.3. Área medida y volumen estimado para el casquete glaciar del Cotopaxi entre 1976 y 1997.Cáceres 2005</i>	44
<i>Tabla 6.4. Áreas para el Casquete glaciar del Cotopaxi períodos 1976-1997/1997-2006</i>	48
<i>Tabla 6.5. Evaluación Chimborazo año 1997.....</i>	50
<i>Tabla 6.6. Evaluación del casquete Glaciar del Chimborazo año 1962.....</i>	54
<i>Tabla 6.7. Áreas para el Casquete glaciar del Chimborazo período 1962-1997</i>	55
<i>Tabla 6.8. Proyección de la cobertura glaciar para el año 2006</i>	56
<i>Tabla 6.9. Evaluación Antisana 1997</i>	57
<i>Tabla 6.10. Evaluación del casquete Glaciar del Antisana año 1956</i>	60
<i>Tabla 6.11. Áreas para el Casquete glaciar del Antisana período 1956-1997.....</i>	61
<i>Tabla 6.12. Proyección de la cobertura glaciar del Antisana para el año 2006.....</i>	62
<i>Tabla 6.13. Proyección de inventario para los glaciares del Ecuador a 1997.....</i>	62
<i>Tabla 6.14. Evolución de la línea de equilibrio para diferentes valores de AAR0.....</i>	63
<i>Tabla 8.1. Proyección de inventario para los glaciares del Ecuador al 2006.....</i>	67

1 Introducción: ¿por qué este estudio?

A diferencia de otras coberturas glaciares tropicales por ejemplo las de Perú o Bolivia las cuales forman grandes masas de hielo con un desarrollo continuo a lo largo de sus cordilleras como por ejemplo la Cordillera Blanca en Perú con una cobertura total aproximada de 1370 y 393 km² respectivamente en el Ecuador los glaciares se desarrollan formando cuerpos aislados sobre los volcanes que conforman el callejón interandino con un total de siete coberturas.

Por encontrarse sobre volcanes activos o potencialmente activos tal es el caso por ejemplo del Cotopaxi, Cayambe, Chimborazo, Antisana, estos presentan un gran riesgo en el caso de producirse un fenómeno volcánico sea de mediana o gran magnitud debido al derretimiento brusco de sus casquetes, lo que generaría el apareamiento de grandes avenidas de agua, rocas y bloques de hielo producidas por el derretimiento brusco del casquete glaciar del volcán, dichas avenidas se las conoce como lahares, fenómeno que por referencias históricas ha causado grandes daños en los valles cercanos al volcán donde se produce e inclusive afecto a poblaciones e infraestructura distante del sitio donde se generaron (*Andrade et al., 1985*).

El retroceso observado sobre los glaciares en Ecuador es un proceso lento pero continuo, durante las dos últimas décadas se ha tenido una importante aceleración de este con algunas pausas donde se pudieron observar ligeros avances o una situación cercana al equilibrio, tal es el caso de los años 1999-2000 y 2001, que fue documentada sobre un glaciar del Antisana y en el glaciar sur oeste Carihuayrazo (*Cáceres et al., 2006*). Dicho proceso se considera tiene relación con los grandes fenómenos climáticos que ocurren a nivel regional como por ejemplo la ocurrencia del fenómeno ENOS en sus dos fases una cálida (El Niño) y otra fría (La Niña), el cual tiene un importante influencia sobre el comportamiento de las coberturas glaciares en el Ecuador (*Francou et al., 2004*). Muy probablemente el fenómeno de retroceso de los glaciares también está influenciado por el calentamiento global que ha sufrido nuestro planeta (*IPCC, 2007*).

Sobre los glaciares del Ecuador se tiene una importante variabilidad interanual del balance de masa, se ha observado que las mayores tasas de ablación ocurren frecuentemente durante los períodos cercanos al equinoccio (marzo y septiembre) donde la radiación solar incidente es máxima, también se han podido identificar otros períodos durante los cuales la fuerte influencia de la velocidad del viento, y nubosidad favorecen los procesos de sublimación sobre los procesos de ablación, de otro lado si la abundancia de las precipitaciones sólidas es grande se favorecen los procesos de acumulación y en algunos casos se ha podido observar pequeños avances tal es el caso de los meses de junio, julio y agosto (*Francou et al., 2004*).

Considerando estos factores, tanto los relacionados con el riesgo, variación climática y disponibilidad del recurso agua en relación con las coberturas glaciares que tienen un papel de regulación importante sobre las cuencas de montaña se hace necesario conocer de manera precisa cuales son sus extensiones y distribución espacial (*Villacís, 2008; Cáceres, 2002; Cáceres, 2007; Andrade et al., 2005*).

El último inventario detallado, data de 1998 (*Jordan et al, 1999*), se considera que es muy necesaria una actualización sobre estos datos que contribuirían en gran parte a

evidenciar el papel de los glaciares como indicadores del cambio climático a nivel local y global.

2 Contexto general de la glaciación en el Ecuador

2.1 Contexto geográfico

La Cordillera de los Andes es uno de los principales sistemas montañosos de América del Sur y se extiende entre los 11^o de latitud Norte y los 56^o de latitud Sur. Su elevación promedio alcanza los 4000 metros existiendo numerosos picos que sobrepasan los 6000 metros, tienen una extensión aproximada de 7500 kilómetros, forman parte del límite entre Sudamérica y el océano Pacífico. Forman parte del sistema de montañas circunpacífico (Werner 1979).

En la región ecuatorial los Andes se estrechan formando una banda entre el escudo Brasileño y el Océano Pacífico (Lewis 1956). Se distinguen tres regiones fisiográficas:

1. La planicie costera ubicada hacia el Oeste (Costa)
2. Las tierras altas de Los Andes (Sierra)
3. La zona de piedemonte andino y las tierras que bajan hasta la planicie amazónica hacia el Este (Oriente).

Las tierras altas Andinas se encuentran formadas por tres zonas conocidas como la Cordillera Occidental, la depresión interandina y la Cordillera Oriental o Real.

Los glaciares en nuestro país se encuentran muy próximos a la línea ecuatorial y se los puede tomar como un buen ejemplo para estudiar el comportamiento de los glaciares tropicales. Las coberturas glaciares actualmente se encuentran restringidas a las zonas de gran altitud (sobre los 4700 m.s.n.m.). Se observan numerosas montañas las cuales por su origen están aisladas unas de otras, razón esta que impide la formación de coberturas glaciares continuas como se puede encontrar en Perú, Bolivia, Chile y Argentina.

Los glaciares en el Ecuador se ubican sobre las dos cordilleras en las cuales se dividen los Andes en el Ecuador, ver *Figura 2.1*. Los rangos de altitud varían entre los 4000 a 6300 m.s.n.m. Actualmente sobre la Cordillera Occidental se tienen 3 coberturas glaciares (Iliniza, Carihuayrazo, Chimborazo) y sobre la Cordillera Oriental se tienen 5 coberturas glaciares (Cayambe, Antisana, Cotopaxi, Tungurahua, Altar). Otras montañas en los últimos años han perdido su cobertura glaciaria, es muy pequeña o es estacional no perdurando por mucho tiempo (Sangay, Sarahurco)

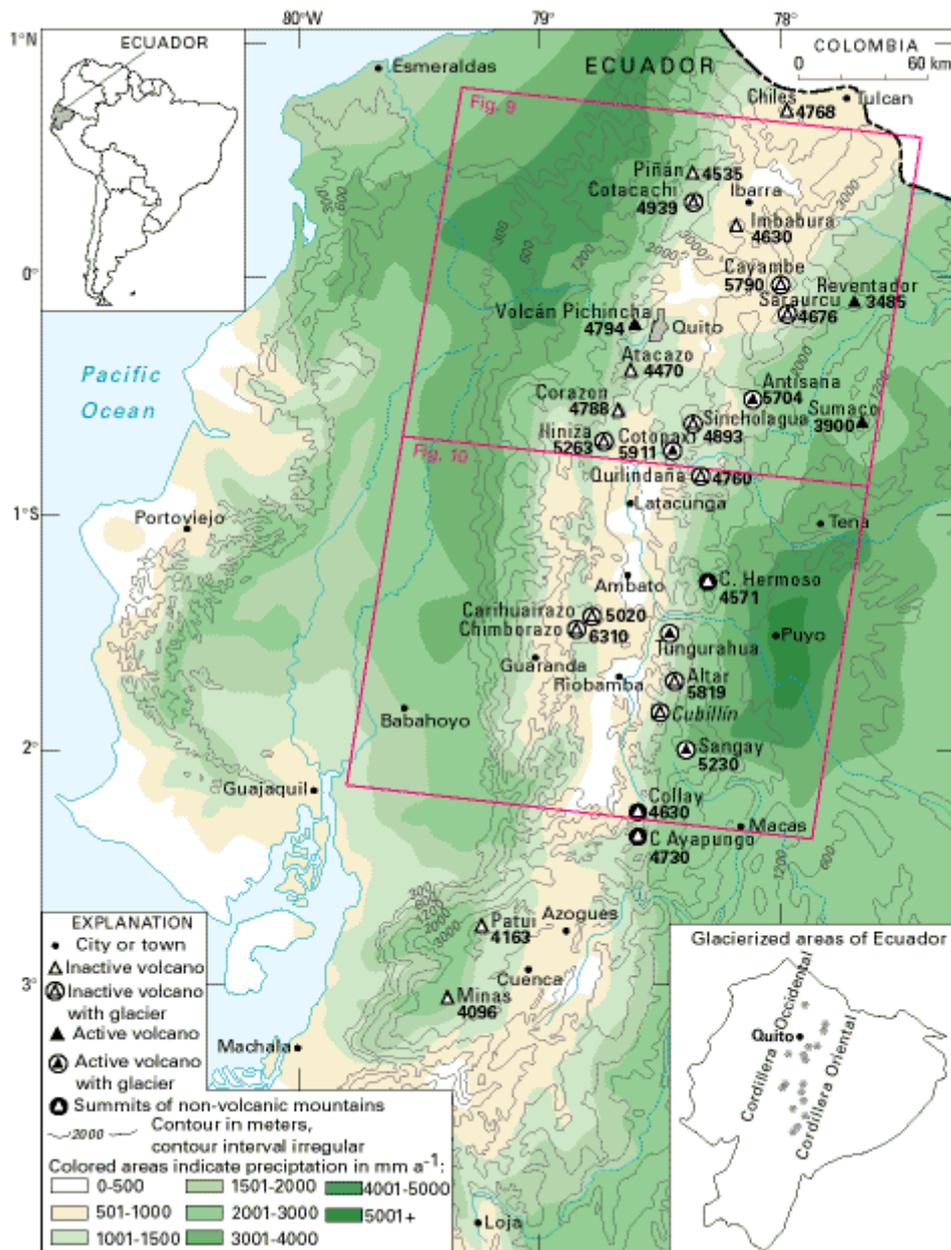


Figura 2.1. Mapa de ubicación de las principales coberturas glaciares. Jordan et al 1998

2.2 Contexto geológico

La Placa de Nazca y la Placa sudamericana convergen a lo largo de un margen activo ubicado al oeste de sud América bordeando la costa con una tasa promedio de 7-8 cm/año con un tren aproximado oeste-este. (De Mets et al., 1990; Kellogg et al., 1995). Para el caso de nuestro país tomamos como punto de partida el Golfo de Guayaquil al sur y al norte la consideramos hasta el borde límite con Colombia, en este segmento la oblicuidad de la subducción debido al movimiento de la placa puede variar desde 30° hasta los 50°, ver Figura 2.2 (Ego et al., 1996). Este hecho favorece el movimiento (escape) del Bloque Nor Andino en una dirección noreste a una tasa aproximada de 1 cm/año a lo largo de la mega falla Guayaquil-Caracas. (Dumont et al., 2005; Ego et al., 1996).

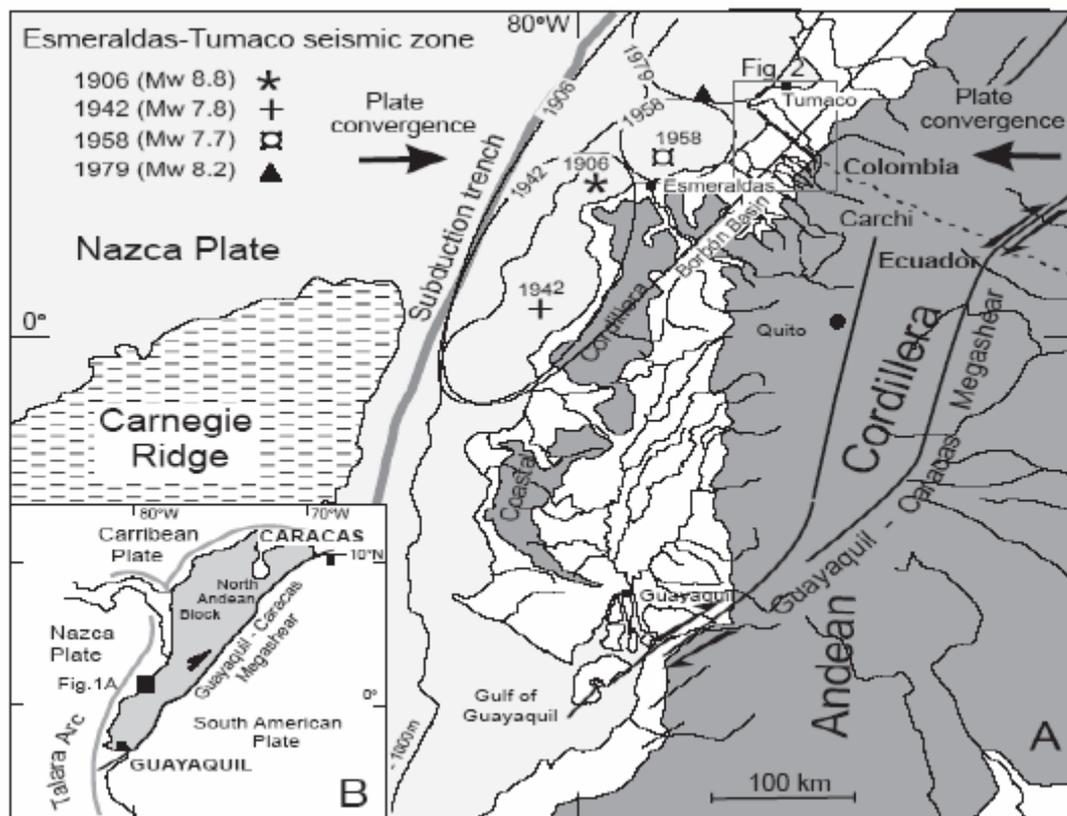


Figura 2.2. Esquema geodinámico del margen activo ecuatoriano. Collot et al. 2004

El movimiento hacia el norte del Bloque Andino se dirige en una dirección aproximada N-S, con un régimen extensional en el margen de la costa Ecuatoriana, se observan fallas de transtensión en sentido NE-SW dextrales y NW-SE sinestras. (Alvarado, 1998; Deniaud, 2000; Dumont et al., 1997, 2005; Santana et al., 2002).

El arco volcánico ecuatoriano forma parte de la Zona Volcánica Norte de los Andes (NVZ), que se extiende desde los 5° N (Volcán Cerro Bravo, Colombia) hasta los 2° S (Volcán Sangay, Ecuador). Al sur de esta latitud no existe volcanismo activo hasta la región de Arequipa, Perú. Este arco es el resultado de la subducción de la placa oceánica Nazca bajo la placa continental de América del Sur (Gutscher et al., 1999).

El arco volcánico ecuatoriano se encuentra desarrollado, en su mayor parte, frente a dicha Cordillera, y presenta una anchura superior a su equivalente septentrional (100-120 km con relación a 30-50 km en Colombia). Así, mientras en Colombia el arco volcánico está constituido por una sola fila de volcanes, a nivel del Ecuador, y particularmente frente a la Cordillera de Carnegie se pueden reconocer varias filas de volcanes, que siguen las estructuras del basamento. (Hall et al 1991) definen 4 alineamientos de volcanes, distribuidos siguiendo la Cordillera Occidental, el Valle Interandino, la Cordillera Real y el Oriente, ver Figura 2.3.

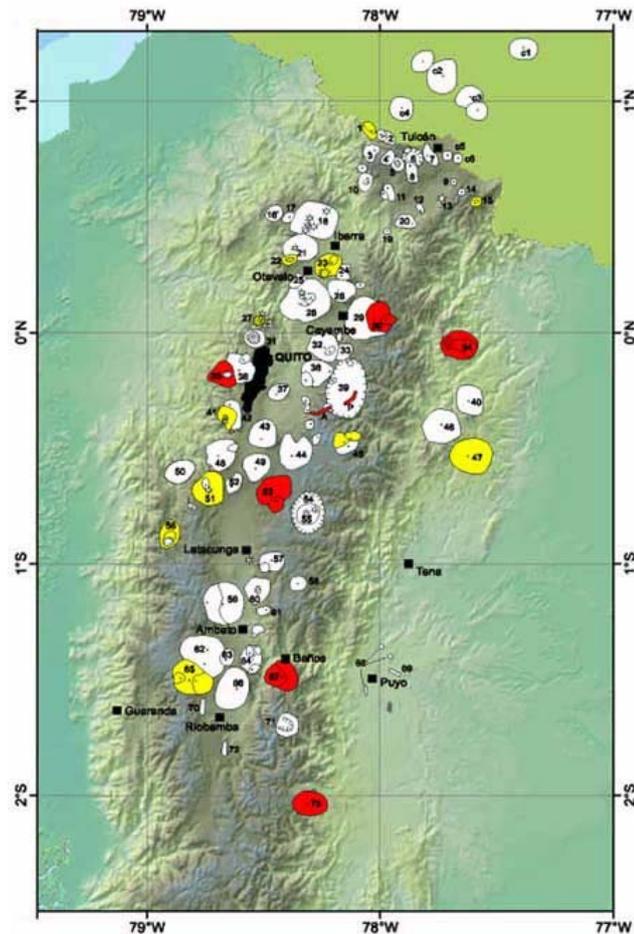


Figura 2.3. Arco Volcánico Ecuatoriano. Modificado de Hall et al. ,1991

Cordillera Occidental:

En cuanto a la edad del volcanismo en esta Cordillera, los datos son escasos. En base a las dataciones dadas por *Barberi et al., 1988*; se puede estimar que la base de los *estrato volcanes* como el Pichincha datan de 1.5 Ma aproximadamente. De todos los centros volcánicos, solo el Guagua Pichincha y el Quiltoa han tenido erupciones en tiempos históricos (a partir de 1532 AD. En cuanto a los otros centros de emisión, su actividad se extendió hasta la última glaciación (entre 50.000 años y 5.000 años antes del presente). Se considera que los volcanes activos de este alineamiento son peligrosos, puesto que sus erupciones tienden a ser muy explosivas, caracterizadas por el crecimiento de domos, la generación de flujos piroclásticos, grandes caídas de ceniza, y la generación de lahares siendo el más representativo el *Chimborazo* por el hecho de tener todavía una cobertura glaciaria muy importante, en el caso de los otros volcanes, este riesgo no existe ya que sus glaciares han desaparecido. Afortunadamente la tasa de recurrencia se mide en cientos a miles de años. (*Hall et al 1991*)

Valle Interandino:

Los volcanes que se encuentran en esta zona desde el punto de vista de la glaciología no implican riesgo ya que no existe la presencia de glaciares que podrían generar la ocurrencia de grandes lahares.

Cordillera Real:

Al Este de la depresión interandina y a lo largo de la Cordillera Real, se encuentra la tercera fila de estrato volcanes. A diferencia de la Cordillera occidental, los edificios

volcánicos en esta Cordillera no se encuentran formando una línea recta, más bien están dispersos sin ninguna organización. La longitud de esta franja alcanza unos 350 Km. con una anchura de hasta 30 km. Su rumbo es subparalelo a la fila volcánica de la Cordillera Occidental. Los principales volcanes que definen este lineamiento son (de Norte a Sur): El Soche, *Cayambe*, Pambamarca, la caldera de Chacana, *Antisana*, Sincholagua, *Cotopaxi*, Chalupas-Sincholagua, Tungurahua, *el Altar* y el Sangay. Dada la frecuencia de sus erupciones, la altura de los estrato volcanes y la frecuente presencia de un casquete glacial, este grupo presentaría bastante peligro en futuras erupciones, que consistiría en flujos de lava, flujos piroclásticos, caídas de ceniza, grandes lahares y posiblemente avalanchas de escombros. (*Hall et al 1991*)

Oriente:

Estos volcanes poseen estrato conos de forma piramidal que indican probablemente una edad joven para estos edificios. Desde el punto de vista glaciológico, estos volcanes no implican riesgo ya que no poseen casquete glaciario.

2.3 Contexto climático

El clima tropical se caracteriza por presentar una atmósfera homogénea sin una actividad frontal, una carencia de una estacionalidad termal y una o dos estaciones de precipitación pronunciada. Consecuentemente, el clima tropical posee característica que influyen directamente sobre los glaciares ubicados en esta zona, con interacciones glaciario-clima diferentes desde las medianas y las altas altitudes. (*Kaser, 1999*)

Desde el punto de vista glaciológico es conveniente dar algunas definiciones útiles sobre el Trópico:

1. Deben estar ubicados astronómicamente en la banda tropical, es decir, entre los paralelos $23^{\circ} 26' 22''$ N Trópico de Cáncer y los $23^{\circ} 26' 22''$ S Trópico de Capricornio (delimitación relacionada con la incidencia de la radiación).
2. Están ubicados en un área donde la variación diaria de la temperatura excede la variación interanual (delimitación termal).
3. El área de oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) (delimitación pluviométrica. (*Figura 2.4*).

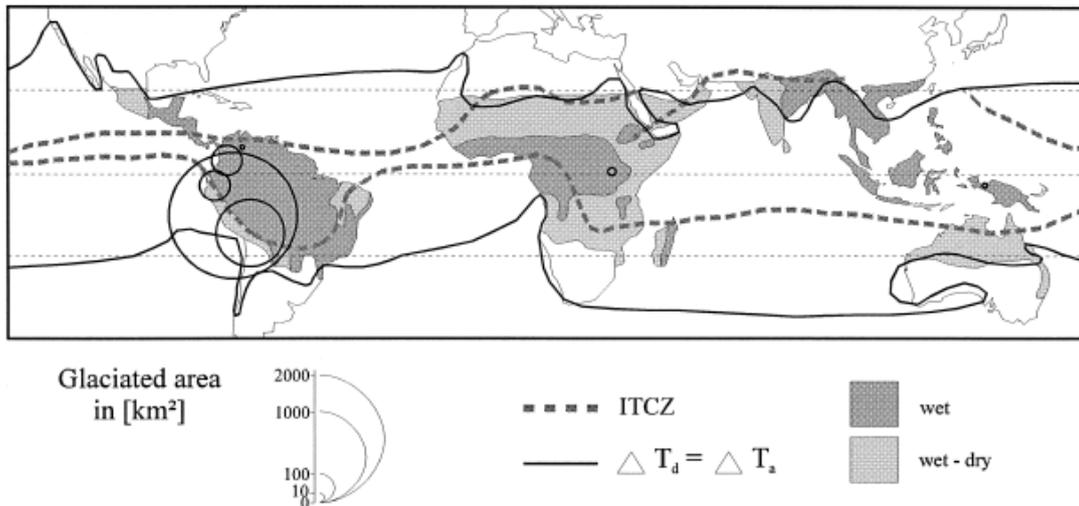


Figura 2.4. Delimitación de los Trópicos desde el punto de vista glaciológico, distribución de los mismos por país y ubicación de ITCZ (Después de Kaser, 1998; Kaser et al., 1996)

De esta forma se puede identificar claramente los regímenes glaciares para estas altitudes. Dentro de estos límites se puede considerar, que para las áreas tropicales externas se tiene una estación húmeda y otra seca, lo que se distingue de las condiciones observadas hacia el interior de la zona tropical con condiciones más o menos continuas de precipitaciones. Adicionalmente se puede observar una homogeneidad termal sobre la atmósfera tropical, incluyendo una constante elevación del nivel de la isoterma 0⁰C, suministrando condiciones favorables para realizar una interpretación sobre las interacciones glaciario-clima. (Kaser, 1995, 1998; Kaser et al., 1996).

Considerando estas definiciones, los glaciares tropicales se los puede encontrar en Irian Jaya (Indonesia, Nueva Guinea), al este de África y sobre los Andes en Sudamérica. En el Ecuador los glaciares se desarrollan a partir de los 4800 o 4900 m.s.n.m. Esta altura es más o menos correspondiente a al isoterma 0⁰C, es decir, la línea que indica el área donde la temperatura es similar al punto de congelación del agua.

En general en los trópicos la variación estacional de la línea isoterma no supera los 500 metros a lo largo del año. Este hecho es la causa para que la ablación en la parte baja de los glaciares sea fuerte durante todo el año.

El retroceso de los glaciares en los últimos años ha sido fuertemente influenciado por un calentamiento de la atmósfera, hecho que se lo demuestra tomando en cuenta los estudios sobre los siguientes parámetros climáticos:

Temperatura: este parámetro fue estudiado considerando su valor a una altura de 1.5 metros del suelo entre 1939 y 1994-1998 usando los datos de 268 estaciones ubicadas entre los paralelos 1⁰N y 23⁰S entre los 0 y 5000 m.s.n.m. Los resultados indican que las temperaturas sobre los Andes Tropicales se han incrementado en 0.10⁰-0.11⁰ C/década desde 1939. Esta tasa de calentamiento se ha triplicado durante los últimos 25 años 0.32⁰- 0.34⁰C/década (Vuille et al., 2000a; Vuille et al., 2003). Ver Figura 2.5.

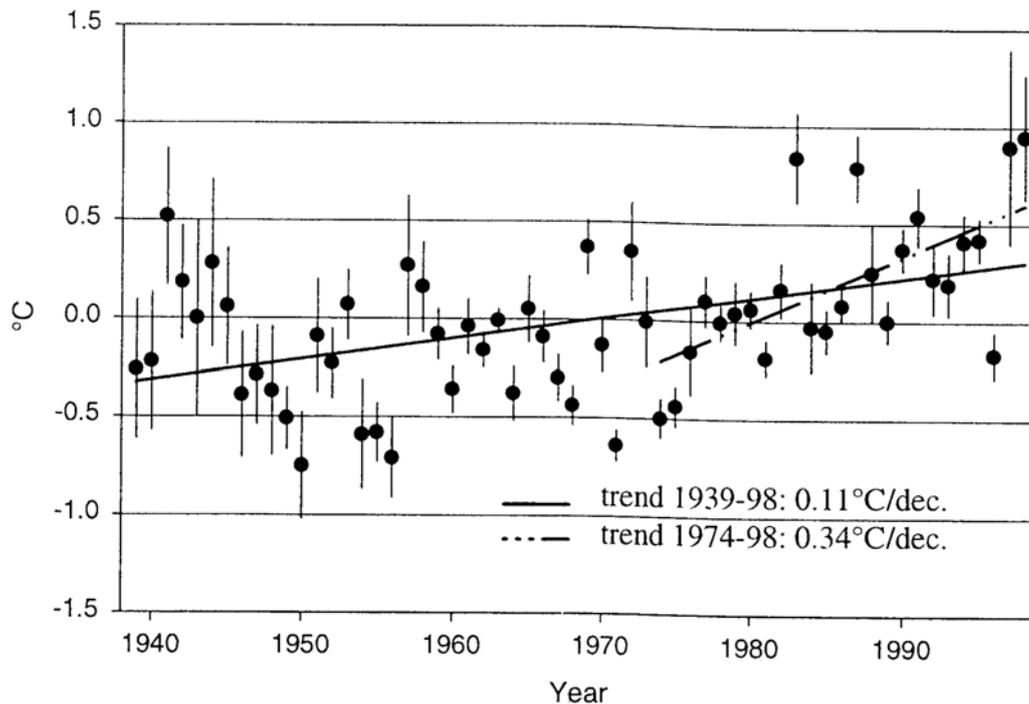


Figura 2.5. Temperatura en los Andes tropicales 1939-1998. Vuille et al. 2000a

Nubosidad convectiva: es la que se forma por los movimientos ascendentes del aire sobre la superficie cálida con presencia de humedad. Estos movimientos producen la formación de nubes (cúmulos nimbos) que tienen un alto poder reflejante.

La radiación de onda larga reflejada por las nubes (OLR) es un buen indicador de la nubosidad convectiva, ya que mientras más alta es esta, más baja es la temperatura emitida (Vuille et al., 2003).

Los resultados muestran que la OLR se redujo ligeramente al norte del paralelo 10° S, lo que indicaría un ligero aumento en la nubosidad convectiva. Este aumento se lo observó especialmente durante la temporada húmeda (diciembre-febrero). Al sur de este paralelo 10° S, se observó que la nubosidad convectiva decreció. (Vuille et al. 2003).

Precipitación: los cambios observados en la precipitación son menos notables que los cambios ocurridos sobre la temperatura. Para el efecto se realizó un estudio sobre los registros de 42 estaciones para los años comprendidos entre 1950 a 1994 para analizar las tendencias sobre las precipitaciones en los Andes de Ecuador, Perú, Bolivia y la parte Norte de Chile y Argentina. (Vuille et al., 2003).

Se observó una tendencia al incremento en la precipitación al norte de los 11° S, en el Ecuador, parte norte y central del Perú ambos en escala de tiempo anual, y durante la parte terminal de la temporada de precipitación del verano austral (diciembre, enero y febrero), mientras que en la parte sur de Perú y en el norte de Bolivia el nivel de precipitaciones habría disminuido. Ver Figura 2.6 (Vuille et al., 2003).

Otros estudios muestran que los trenes de precipitación a escala regional muestran incrementos notables en el tiempo. Todos estos reportes se refieren al flanco este de los Andes, o de las tierras bajas ubicadas hacia el este, por ejemplo los reportes sobre las estribaciones orientales de los Andes del Ecuador durante la época lluviosa de mayo, junio, julio (Vuille et al., 2000b), los flancos orientales al NW en Argentina (Villalba et al. 1998) y las tierras bajas al este en Bolivia (Ronchail, 1995).

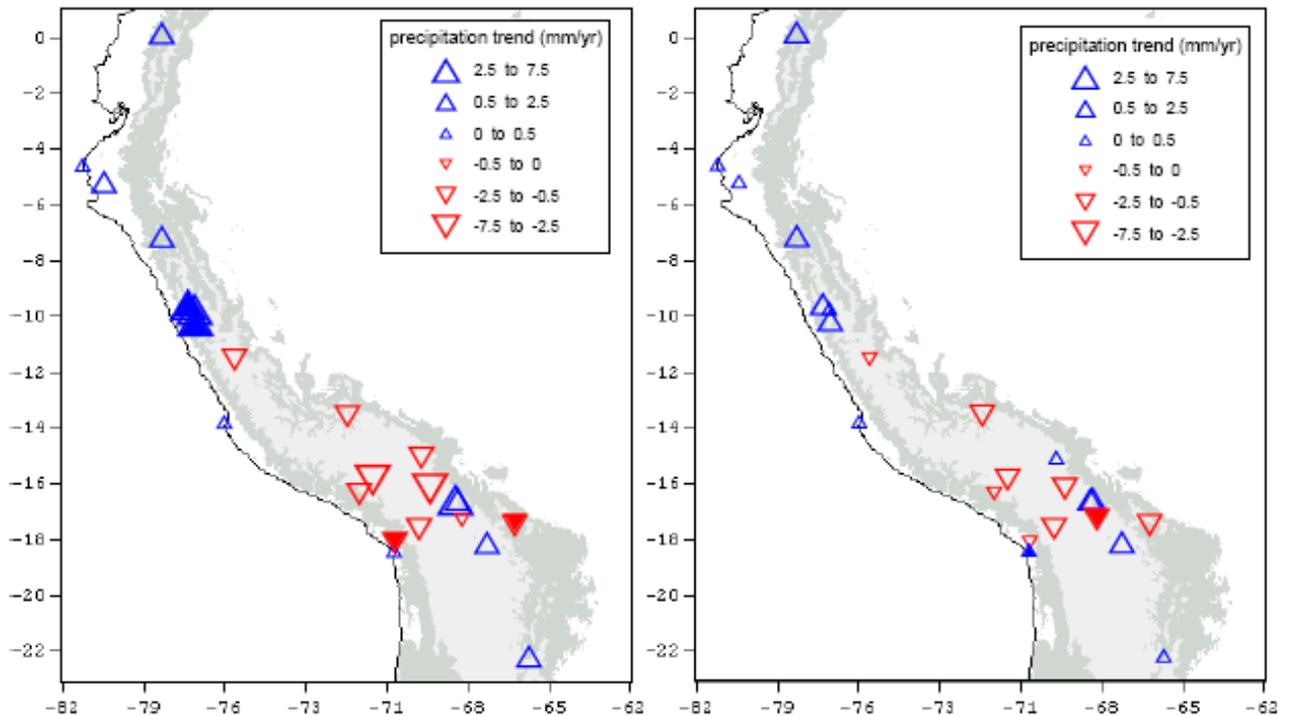


Figura 2.6. Tren de precipitación periodo 1950-1994. Izquierda suma anual, derecha verano austral (diciembre, enero, febrero). Modificado de Vuille et al. 2003

▲ Valores de precipitaciones con incremento

▼ Valores de precipitaciones con disminución

La variabilidad observada en las precipitaciones está estrechamente relacionada con la variación de la temperatura superficial del mar sobre el Pacífico ecuatorial. Durante la ocurrencia de los eventos cálidos, un déficit de lluvia tiende a producirse durante la ocurrencia de la temporada húmeda en todas las zonas con coberturas glaciares en el Altiplano, la Cordillera del Norte de Bolivia y la cordillera Sur del Perú, con una atenuación paulatina hacia el norte (Francou et al., 1985; Aceituno 1988; Vuille et al., 2000a).

Hacia el norte durante los eventos cálidos solamente se observa una disminución sistemática de los totales precipitados sobre la parte noreste de Ecuador y en Colombia.

Humedad atmosférica: Se han observado cambios significativos durante los últimos 45 años con un aumento que oscila entre el 0% y 2.5 % cada diez años. Este aumento es más marcado en el Ecuador y Sur de Colombia, más moderado en el Sur de Perú, oeste de Bolivia y norte de Chile oscilando entre el 0.5 y 1.0% por decenio.

Los resultados sugieren que el incremento de la humedad atmosférica no se produjo solamente por el efecto físico del aumento de temperatura, sino que la presión de vapor creció tanto en términos absolutos como relativos. (Vuille et al. 2003)

Al nivel de los glaciares del Ecuador los años secos y cálidos que corresponden a “El Niño” provocan una elevación en la ubicación de la línea de equilibrio, mientras que en los años húmedos y fríos “La Niña”, esta línea baja. (Cáceres et al., 2005; Cáceres et al., 2006)

2.4 Los glaciares del pasado según distintas fuentes: variaciones históricas

2.4.1 Extensiones glaciares antes de la Pequeña edad de hielo (PEH)

En el Ecuador los avances glaciares producidos durante la última parte del cuaternario han sido descritos por Heine y Clapperton (*Heine, 1995 a, b; Heine, 1996 a; Clapperton et al., 1997*) dando diferentes interpretaciones a las épocas de recesión. La estratigrafía glacial, los principales límites para las morrenas terminales, y las edades para las morrenas sobre los Andes del Ecuador son presentados en la Figura 2.7.

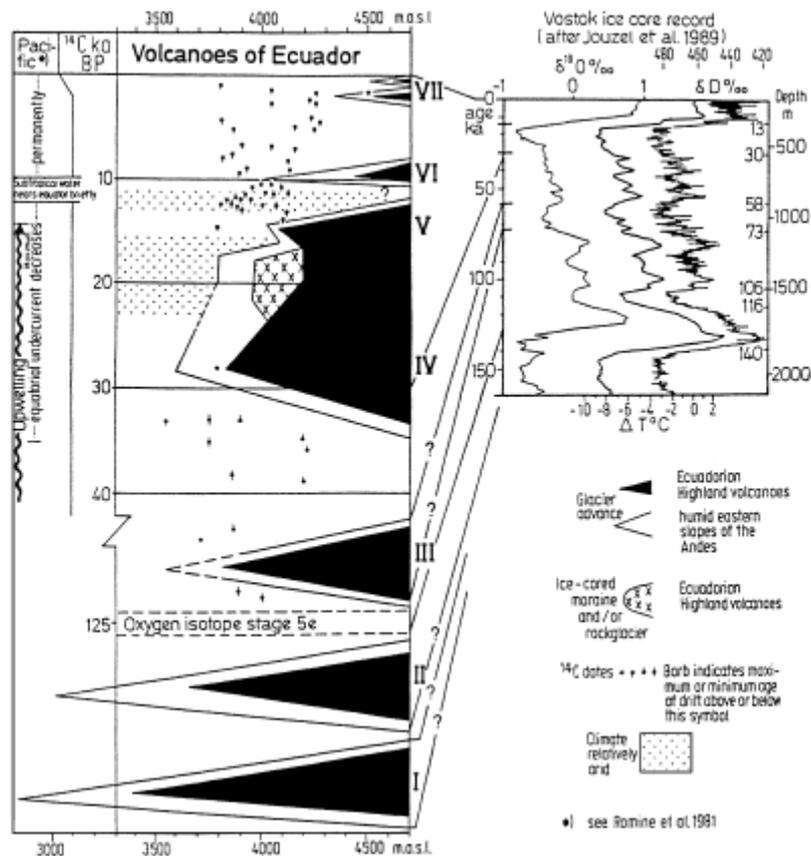


Figura 2.7. Estratigrafía de los Andes del Ecuador. Heine 1995 a, b

Heine presenta una secuencia de siete eventos glaciares variando en edad desde Pre Wisconsin hasta la pequeña edad de hielo (*Heine 1995 b*). Concluye que las masivas morrenas que comúnmente se pensaba pertenecían al máximo del último período glacial (LGM) son más antiguas y se formaron durante la parte media y temprana de la última glaciación y la penúltima glaciación, ver *Tabla 2.1*.

Estas se las numeró desde M1 hasta M7, donde M1 corresponde a la más antigua ubicándose en el Pleistoceno medio. Las morrenas M4 fueron depositadas durante el último período glacial (LGM). Las morrenas M5 y M6 corresponden a una edad del tardío glacial u Holoceno temprano. (*Heine et al., 1996 b*)

Age and duration			Lower limit (mean value) in m		Schubert and Clapperton (1990)		
					Lower limit		
yr BP × 10 ³			Western and central Cordillera	Eastern Cordilleran slopes	West	East	Age
M VII	Little Ice Age	> 0.01	4800-4500	4400-3900	4800-~4100		Neoglacial interval
	Neoglacial	< 3.5			4600-3900		
M VI	Early Holocene and/or Late Pleistocene	> 8.2	4500-4200	4050	4400-3800		Late-Glacial stade
	Late Pleistocene	< 10.6					
M V	Late Pleistocene	> 13	4100-4000	3800-3700	3700-3600		Last Glaciation (late)
		< LGM					
M IV	Last Glacial Maximum (LGM)	> 15	4000-3800	3750-3500	3900-3000		Last Glaciation (main)
		< 25					
M III	Wisconsin (stage 4?)	> 49.5	3900-3800	?			Last Glaciation (early)
M II	Pre Wisconsin (stage 6?)	> 125	3700	3200-3000	3500-2900		
M I	Pre Wisconsin (stage 6?, stage 8?)	> 150-180	3500	2800	3500-2750		Penultimate Glaciation

Tabla 2.1. Secuencia glacial del Cuaternario, límites de las morrenas terminales, edades de los avances glaciares sobre los Andes del Ecuador. Heine 1995 b

Las variaciones ocurridas durante la reciente glaciación pueden en parte ser reconstruidas tomando como base las descripciones realizadas por varios autores durante la época de la colonización, y los diarios de varias expediciones científicas realizadas en los Andes ecuatorianos durante los 200 últimos años. Los primeros datos útiles datan del siglo XVI y se los puede encontrar en los archivos municipales y eclesiásticos de la ciudad de Quito, y en el Archivo Español de Indias (*Hastenrath, 1981; Jordan et al., 2003; Francou, 2004*).

2.4.2 La pequeña edad de hielo

Este término se refiere a un período frío que se desarrolló entre los siglos XIV y XIX. Según algunas estimaciones se calcula que la temperatura fue 1 o 2^oC más baja que el promedio 1961-1990. (*Jomelli et al., 2009; Jomelli et al., 2006*)

Para documentar la evolución de los glaciares en este periodo se realizó un estudio para datar las morrenas de esta época utilizando la liquenometría, la cual fue aplicada sobre 90 glaciares entre Ecuador, Perú y Bolivia. (*Rabatel et. al, 2005, 2006; Jomelli et al., 2006*). Este método debe ser complementado con otros métodos para proporcionar fechas definitivas. En Ecuador y Perú, también se utilizaron archivos históricos y relatos como soporte para estimar las extensiones de los glaciares y sus fechas aproximadas (*Francou, 2004*). Los resultados de estos trabajos muestran evidencias claras de un avance durante la pequeña edad de hielo en los Andes tropicales.

Sobre los Trópicos (paralelos 0^oS a 6^oS) la extensión máxima de la Pequeña edad de hielo ocurrió sobre dos periodos. El primero sobre los glaciares ubicados por encima de los 5700 m.s.n.m. (Por ejemplo Chimborazo, Antisana) ocurrió alrededor de 1730. Un segundo periodo se observó sobre los glaciares ubicados bajo los 5400 m.s.n.m., sobre los cuales ocurrió alrededor de 1830. Algunas mediciones también registran este; último avance sobre picos de mayor altura (*Jomelli et. al., 2006*).

Más al norte en Venezuela se han registrado avances sobre dos periodos 1640-1730 y 1800-1820 (*Polissar et al., 2006*).

Sobre la parte exterior de los trópicos (Paralelos 10°S a 16°S) la extensión máxima de este periodo ocurrió unas décadas antes. En Perú sobre la Cordillera Blanca apareció alrededor de 1630. En Bolivia ocurrió entre 1657 y 1686. (Rabatel, 2005; Rabatel et al., 2005,2006).

A partir de la extensión máxima de la pequeña edad de hielo, los glaciares tropicales han evolucionado de una manera notablemente homogénea. Se observa un retroceso lento entre los siglos XVIII y XIX, observándose un rápido incremento a partir de 1840. Ver Figura 2.8. (Jomelli et al., 2009, in press)

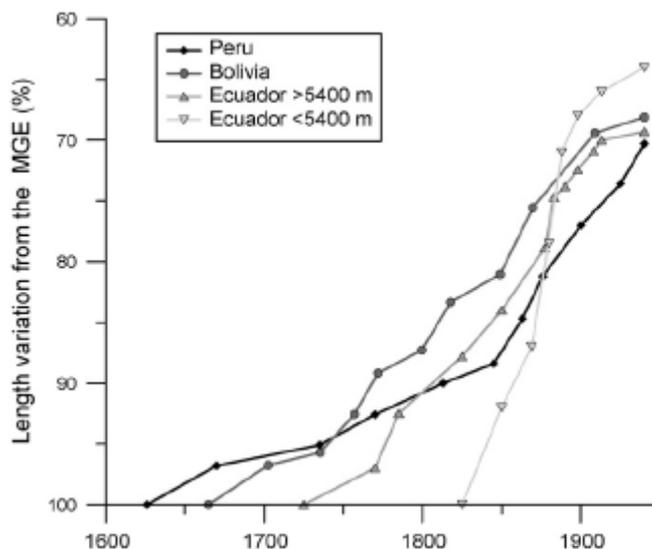


Figura 2.8. Evolución de la longitud desde la máxima extensión glacial (MGE) para cuatro glaciares de los Andes tropicales (Charquini, Akilpo, Meyer y Carihuayraza a altas y bajas elevaciones respectivamente). Jomelli et al. 2009 In press

También se han realizado estudios para conocer las fluctuaciones de la línea de equilibrio (ELA). Sobre la cordillera Real de Bolivia se estimó un incremento en la altitud de ELA determinado geoméricamente de alrededor de 150 metros utilizando el método del área promedio de acumulación. (Rabatel et al., 2008). Sobre la cordillera Blanca en el Perú se observó un comportamiento similar utilizando el mismo método. (Jomelli et. al, 2009, in press).

En el Ecuador análisis históricos han revelado un incremento en la altitud de la línea de nieve que se lo puede relacionar con la ELA y se lo ubica entre los 200 a 300 metros desde el siglo XVIII hasta finales del siglo XX. Para mediados del siglo XVIII, el límite inferior de la línea de equilibrio en el valle interandino central de acuerdo a observaciones (La Condamine 1751, Bouguer 1748) se situaba a los 4700 ± 50 metros. Observaciones realizadas entre 1869 y 1873 estiman un valor de 4800 ± 50 metros. Para inicios del siglo XX esta fue ubicada a 4830 m.s.n.m. (Meyer, 1907). En la década de los treinta esta fue ubicada a los 4950 m.s.n.m. (Hastenrath, 1981). Estudios recientes realizados sobre el glaciar 15 del Antisana (Cordillera Oriental) ubican a ELA_0 aproximadamente a los 5045 m.s.n.m. (Jomelli et al., 2009; Cáceres et al., 2008). Ver figura 2.9.

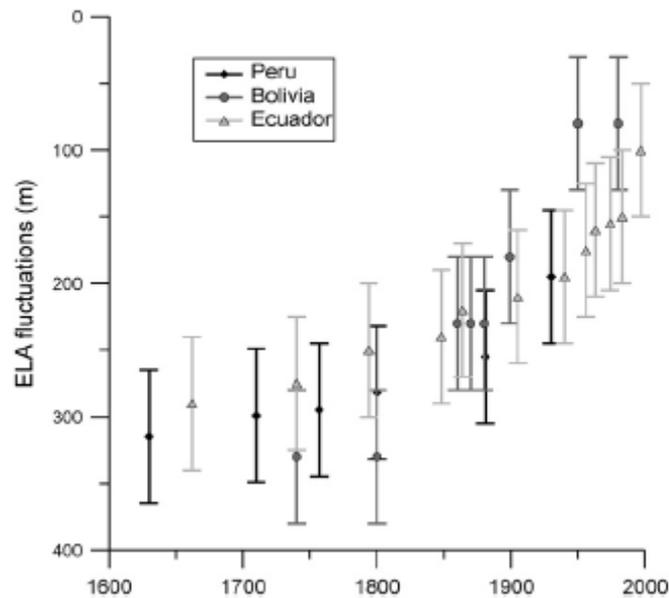


Figura 2.9. Fluctuaciones estimadas sobre la línea de equilibrio (ELA) estimadas utilizando el método del área promedio de acumulación (AAR). Jomelli et al.2009. In press

2.5 Inventarios de los tipos de estudios efectuados:

- **Balace de masa :**

El estudio del balance de masa sobre el glaciar 15 del Antisana se lo realiza desde el año de 1995 hasta la actualidad, sobre el glaciar de Los Crespos comenzó su monitoreo a nivel mensual desde el año de 2005, sobre el glaciar del Carihuayrazo se realiza una medición por año de manera esporádica.

El déficit sobre el Glaciar 15 del Antisana como promedio para estos trece años de monitoreo alcanza el valor de -682 mm de equivalente agua repartidos sobre toda la superficie del glaciar (0.28 km²) como promedio por año, ver *Tabla 2.2.* (Cáceres et al., 2008; Cáceres et al., 2007).

Año	B _n	ΣB _n	A	B _{ier}	B _{sum}	ELA	AAR	Prec.	Term.	ΣTerm.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1995	-1830	-1830	2580	-7624	654	5245	45	750	-28	-28
1996	-342	-2172	1224	-4532	826	5040	68	882	-41	-69
1997	-639	-2811	1624	-6949	870	5113	63	985	-56	-125
1998	-912	-3723	2052	-6048	675	5160	58	1140	-34	-159
1999	510	-3213	705	-2214	1080	4950	83	1215	21	-138
2000	378	-2835	647	-2045	890	4990	80	1025	18	-120
2001	-598	-3433	1348	-4830	940	5110	64	750	-18	-138
2002	-1038	-4471	2139	-4999	900	5215	50	1101	-19	-157
2003	-1366	-5837	2121	-6633	810	5203	52	755	-31	-188
2004	-604	-6441	1384	-5420	957	5172	55	780	-31	-219
2005	-1216	-7657	2133	-6580	878	5152	57	917	-28	-247
2006	-203	-7860	1119	-4030	985	5150	57	916	-10	-257
2007	-904	-8764	1820	-4459	916	5140	58	916	-7	-264
2008	337	-8427	806	-2140	1080	4985	85	1143	8	-256
Promedio	-602	---	1550	-4893	890	5116	63	948	-18	----

Leyenda (1) Año hidrológico (enero–diciembre), (2) Balance neto específico (mm de agua), (3) Balance neto acumulado (mm de agua), (4) Ablación específica: $A = P - B_n$ (mm de agua), (5) Balance en la parte más baja (4833 m en mm de agua), (6) Balance en la parte más alta (5750 m en mm de agua), (7) Altitud de la línea de equilibrio (ELA), (8) Porcentaje de la área de acumulación (Accumulation Area Ratio (en %), (9) Precipitación en las cercanías del glaciar: $P = [P_2]$ (en mm de agua), (10) Retroceso del frente (en metros referidos a la marca precedente), (11) Retroceso acumulado del frente (en metros).

Tabla 2.2. Resumen de los datos glaciológicos medidos sobre el Glaciar 15 del Antisana. Modificado de Cáceres et al., 2008

- **Balace de energía:**

Se conoce que la radiación entrante de onda larga juega un papel importante en la estacionalidad del balance de masa. Durante la época húmeda la radiación saliente de onda larga es compensada por una gran radiación similar pero entrante, producida por la alta nubosidad y humedad del aire. Este flujo representa una importante fuente de energía para el glaciar, especialmente a bajas alturas. También explica el hecho de que el escurrimiento sea constante durante todo el verano, inclusive cuando el glaciar está cubierto por gran cantidad de nieve. (Sicart et al, 2005).

También se debe considerar el balance de las ondas cortas (Sw) entrantes y salientes que están relacionadas con la intensidad del albedo, y los flujos turbulentos que están relacionados con los flujos de calor latente y sensible. (Favier et al, 2004).

En el Ecuador la estacionalidad del balance de masa presenta una importante variabilidad interanual. No se conoce con mucha certeza la estacionalidad de la acumulación a grandes altitudes, debido a que esta medición se la realiza una vez por año. Mediciones realizadas en áreas cercanas a la zona de ablación sugieren que los períodos de acumulación más importantes son abril-junio y agosto-octubre. (Favier et al., 2004 a y ; Francou et al., 2004). Para el Glaciar 15 del Antisana se ha medido una acumulación promedio de 980 mm en equivalente de agua para el período 1995-2008. (Cáceres et al., 2008-informe-2010)

Las mayores tasas de ablación coinciden con los equinoccios, esto es con los períodos de mayor radiación solar en el Ecuador. Observándose que la variabilidad es mayor alrededor y después del primer equinoccio (abril-mayo) y alrededor del segundo (septiembre), dependiendo de la naturaleza y frecuencia de las precipitaciones. (Favier et al., 2004 a y b; Francou et al., 2004)

- **Geometría del Glaciar.**

Los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos topográficos y aero fotogramétricos son bastante consistentes con una precisión de 8 metros, los levantamientos obtenidos han sido combinados para obtener el retroceso producido en el glaciar desde el año de 1956 (Cáceres, 2002).

Para los doce años, las lenguas alfa y beta han retrocedido de siete a ocho veces más rápido que durante el período comprendido entre 1956 y 1993, mientras que el área total del glaciar quince ha disminuido tres veces más rápido. El glaciar se ha reducido en un 38.5% desde el año 1956. Ver *Tabla 2.3.* y *Tabla 2.4.* (Cáceres et al., 2007).

Año	Area α	Area β	Area Total	%	% de Reducción 1956-2008	% de Reducción 1993-2008
1956	465802	501835	967638	100,0	0,0	---
1965	439519	485076	924595	95,6	4,4	---
1993	375412	429262	804673	83,2	16,8	0,0
1996	351710	419926	771636	79,7	20,3	4,1
1997	340749	406431	747180	77,2	22,8	7,1
1998	333356	403950	737305	76,2	23,8	8,4
1999	342117	408331	750448	77,6	22,4	6,7
2000	365464	428634	794098	82,1	17,9	1,3
2001	346139	412772	758911	78,4	21,6	5,7
2002	322614	387266	709879	73,4	26,6	11,8
2003	308616	358023	666639	68,9	31,1	17,2
2004	300207	351494	651701	67,3	32,7	19,0
2005	282511	337490	620001	64,1	35,9	22,9
2006	276860	330740	607600	62,8	37,2	24,5
2007	271322	324125	595447	61,5	38,5	26,0
2008	287989	340792	628781	65	35	21,9

Tabla 2.3. Evolución del área para el glaciar 15 del Antisana
Modificado de Cáceres et al, 2008

Año	Longitud (m)	Long. Perdida/Ganada (m)	Pérdida (%)
1956	2235	0	0
1956-1965	2193	-42	2
1965-1993	2103	-90	6
1993-1996	2049	-54	8
1996-1997	1989	-60	11
1997-1998	1963	-26	12
1998-1999	1979	16	11
1999-2000	2006	27	10
2000-2001	1979	-27	11
2001-2002	1964	-15	12
2002-2003	1910	-54	15
2003-2004	1883	-26	16
2004-2005	1856	-27	17
2005-2006	1846	-10	17
2006-2007	1840	-7	18
2007-2008	1848	8	17

Tabla 2.4. Evolución de la longitud para el glaciar 15 del Antisana
Modificado de Cáceres et al. 2008

Sobre el glaciar 15 se ha podido medir velocidades promedio de movimiento para la parte alta de la zona de ablación del orden de 35 m/año, en la parte más baja se tiene valores promedio del orden de 24 m/año el área del glaciar 15 representa el 44.1% del total de la cuenca. (Cáceres 2002, Cáceres et al. 2008).

Para el glaciar sur oeste del Carihuayrazo se ha realizado el levantamiento desde el año 2003 de manera continua observándose una reducción del 52.6% si se considera como punto de partida la evaluación correspondiente al año 1956, para ello se completaron los trabajos de topografía directa con la fotogrametría digital. Ver Tabla 2.5. (Cáceres et al 2008)

Año	Area (m ²)	Modo	% de Reducción
1956	333422	Fotogrametría	0
2003	234249	Levantamiento directo *	29,7
2004	215019	Levantamiento directo *	35,5
2005	180729	Levantamiento directo *	45,8
2006	168841	Levantamiento directo *	49,4
2007	163438	Levantamiento directo *	52,6

Tabla 2.5. Evaluación Glaciar Sur Oeste del Carihuayrazo, período 1956-2007
Modificado de Cáceres et al. 2008

Para el glaciar de Los Crespos se disponen de datos desde el año de 2004, observándose una reducción del 0.5%. Ver tabla 2.6. (Cáceres et al 2008)

Año	Area (m2)	Modo	% de reducción
2004	1714689	Fotogrametría+levantamiento directo	0
2006	1704679	Fotogrametría+levantamiento directo	0,6
2007	1696156	Fotogrametría+levantamiento directo	0,5

Tabla 2.6. Evaluación Glaciar Los Crespos del Antisana, período 2004-2007
Modificado de Cáceres et al. 2008

Hidrología:

A nivel de la ciudad de Quito (2.440.000 de habitantes en 2008) capital del Ecuador, estimaciones preliminares nos indican que los aportes de agua de origen glaciar representarían entre el 4% y el 2% del total anual de agua potencialmente consumida en Quito ($5.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Sin embargo a nivel local, en una cuenca de 15.1 km^2 del volcán Antisana, con 15% (85%) de cobertura glaciar (páramo) y cuyo cierre se ubica a 4000 m de altitud (cota aproximada de algunas de las captaciones actuales y previstas en los proyectos de alimentación en agua potable de la ciudad de Quito), la presencia de reservorios glaciares permite contar con una contribución adicional (del orden del 35% durante los meses noviembre a febrero) a la contribución del páramo. (Villacís, 2008; Villacís et al., 2009)

Durante los meses de mayo a agosto la contribución adicional por parte del glaciar sería del orden del 10%. A nivel anual la contribución de los glaciares es del 24 % y este porcentaje podría aumentar hasta un 37%, si el agua infiltrada al nivel del glaciar (aproximadamente entre 5700 m y 4700 m de altitud) resurge antes de los 4000 m. Estas resurgencias podrían contribuir a la alimentación de acuíferos y a reforzar la capacidad de producción de agua de las zonas de saturación de la cuenca. (Villacís et al., 2009)

Por lo tanto, la reducción del aporte glaciar en este tipo de cuenca como consecuencia del cambio climático, podría perjudicar negativamente no solamente al volumen anual producido y a la capacidad de regulación, sino que indirectamente podría afectar la alimentación hacia los acuíferos de la cuenca y perturbar la capacidad de producción de las zonas de saturación. Situación que podría darse también en los alrededores de los volcanes Cayambe, Cotopaxi y Chimborazo. (Villacís et al., 2009).

Simulaciones preliminares con modelos hidro-glaciológicos en etapa exploratoria realizadas en la cuenca del glaciar 12 (Hastenrath, 1981) con 67% de cobertura glaciar del volcán Antisana, muestran que el aporte glaciar podría desaparecer en 140/60 años, bajo el efecto de un calentamiento de $1.8^\circ\text{C}/5.7^\circ\text{C}$ por siglo correspondiente al escenario hipotético B1/A2 menos/más pesimista del IPCC (Grupo Intergubernamental

de Expertos sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés). Para estas simulaciones la precipitación fue considerada constante (Villacís, 2008). Sobre la Tabla 2.7 se muestran los resultados obtenidos para el estudio realizado en dos cuencas ubicadas en la parte Oeste del volcán Antisana.

Cuenca	Area (km ²)	Area Glaciar (km ²)	Rango Altitudinal (m)	Bn (mm)	Q (L s ⁻¹)	P (mm)	Le (mm)	Sb (mm)	Ke (%)
Glaciar 15 ^(a)	0.7	0.7	4850-5760	-319	25	1124	1079	365	96
Glaciar 12 ^(b)	1.6	1.6	4750-5760	-1082	87	953	1715	320	180
Linmi 15 ^(a)	1.4	0.7	4520-5760	----	17	1124	368	---	36
Los Crespos ^(b)	2.4	1.6	4510-5760	---	56	953	736	---	77
Humboldt ^(b)	15.1	2.2	4010-4750	---	236	757	492	---	65
QCr – Qhu ^(b, c)	12.3	0.0	4010-4750	---	180	855	439	---	51

Bn: balance neto específico interanual; Q: caudal interanual; P: precipitación interanual promedio sobre la cuenca; Le: Lamina escurrida interanual; Sb: sublimación promedio interanual; Ke: coeficiente de escurrimiento interanual

^a Para el periodo 1997-2002, según Favier et al., 2008

^b Para el año 2005, según Villacís 2008

^c Caudal estimado como la diferencia entre los caudales horarios de Humboldt y Los Crepos tomando en cuenta un desfase de 2 a 3 horas.

Tabla 2.7. Evaluaciones hidrológicas para dos cuencas del volcán Antisana Villacís et al 2009

Todos estos estudios se han concentrado en la zona del Antisana debido a que este, está ubicado en una zona en la cual se capta el recurso agua para el abastecimiento de una gran población, es decir su importancia económica es alta, por ser un pequeño glaciar presenta las facilidades para ser estudiado, también presenta ventajas relacionadas con su morfología regular y facilidades para el acceso. Su estudio permite conocer el comportamiento de un glaciar tropical ubicado muy cerca de la línea ecuatorial proveyendo de valiosa información a la comunidad científica sobre su repuesta a las variaciones climáticas a pequeña y a gran escala como es por ejemplo el fenómeno ENSO en sus dos fases.

2.6 Interés de realizar un inventario de los glaciares del Ecuador

La actualización de este inventario proveerá de información sobre las coberturas glaciares actuales lo cual es de gran importancia para las poblaciones asentadas en su zona de influencia, ya que permitirá evaluar de manera preliminar la cantidad de agua que se almacena allí, a futuro con la realización de estudios complementarios sobre el espesor de la cobertura de hielo se podrá conocer de manera más precisa su volumen real, esto permitirá realizar una planificación sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos de las cuencas adyacentes a los glaciares (páramo).

Estos estudios de manera complementaria servirán para hacer en una etapa posterior una evaluación sobre el riesgo asociado a estas coberturas, debido a que en el Ecuador estas se hallan en volcanes activos o potencialmente activos como es el caso del Cotopaxi,

Cayambe, Chimborazo, los cuales en el caso de presentarse un fenómeno eruptivo generarían lahares de grandes proporciones que afectarían de manera importante a las poblaciones cercanas, hecho que ya ocurrió en el pasado, y que se lo puede asociar con una alta vulnerabilidad.

También estas evaluaciones servirán para conocer a futuro de manera más precisa la evolución temporal de las coberturas y poder correlacionar estas con los cambios climáticos ocurridos en el pasado cercano.

3 Estado del conocimiento de los glaciares durante las últimas décadas

3.1 Variaciones de longitud y área

La recesión observada durante los siglos XVIII y XIX sobre los glaciares en lo que se refiere longitud, superficie y volumen total no es lineal y muestra fuertes variaciones a lo largo del tiempo dependiendo de las condiciones climáticas, geológicas, etc.

(*Vincent et al., 2005; Jomelli et al., 2009 in press*)

Sobre los Andes Tropicales documentos y referencias sobre la cobertura de nieve, han permitido reconstruir la posición aproximada de la línea de equilibrio tentativamente desde comienzos del siglo XVIII (*Ames et al., 1995; Francou, 2004; Francou et al., 2005 in press; Hastenrath S., 1991; Kaser et al., 1997*).

En el Ecuador se encuentra información para unos pocos glaciares como es el caso del Cotopaxi, Antisana, Chimborazo, Altar, Pichincha, Carihuayrazo, desafortunadamente esta información no es continua y en algunos casos no es muy precisa. (*Hastenrath 1981; Rabatel et al., 2005; Rabatel et al., 2006; Jomelli et al., 2006; Jomelli et al., 2009 in press*).

La información sistemática sobre la cobertura glaciar en el Ecuador se inició con la toma de las primeras fotografías aéreas en el año de 1956 por parte del Instituto Geográfico Militar (IGM), mediante el proceso de fotogrametría en combinación con trabajos de campo se levantaron los primeros mapas glaciares a partir de los años sesenta. (*Hastenrath 1981; Cáceres 2003; Cáceres et al., 2004; Cáceres 2005; Cáceres 2008; Jordan et al., 2003; Sauer 1965*)

Complementariamente se han realizado estudios para datar las morrenas que se encuentran en las cercanías de los principales casquetes glaciares con la finalidad de establecer con más precisión las coberturas glaciares desde el siglo XVIII. (*Jomelli et al., 2009 in press*).

Sobre los Andes tropicales se han realizado medidas sobre las longitudes de algunos glaciares, los cuales son estudiados en detalle, estableciéndose que se ha producido una fuerte recesión desde 1930, la cual es generalizada. Esta tendencia no es única, observándose durante los años setenta un cambio con un retroceso moderado (*Figura 3.1*), el cual se aceleró nuevamente a partir de los ochenta. (*Francou et al., 2007*).

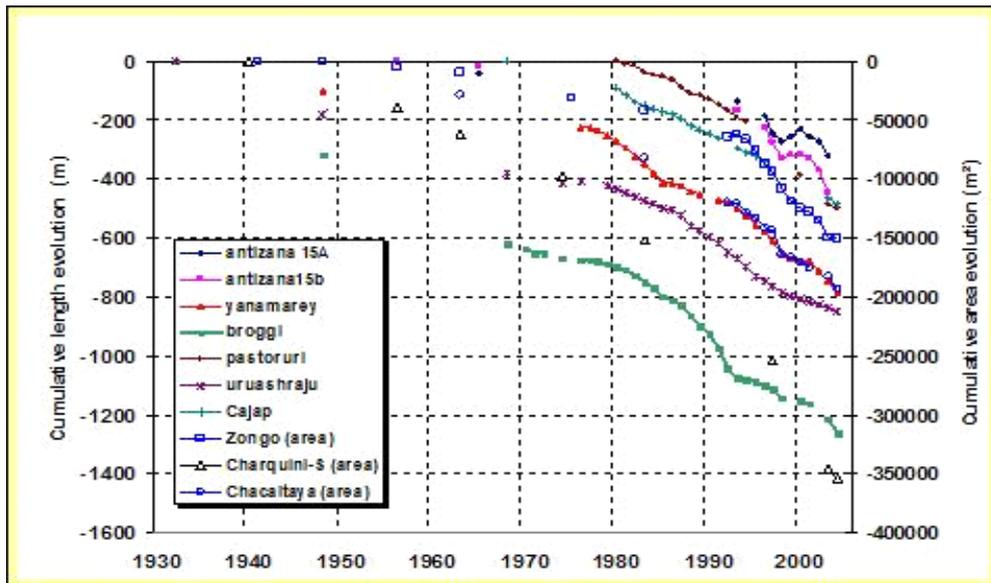


Figura 3.1. Evolución de la longitud y área de varios glaciares Tropicales en Sudamérica. Francou et al. 2007

Durante los últimos 20 años las pérdidas observadas sobre las coberturas glaciares han sido generalizadas, observándose un pequeño avance durante el período 1999-2001, el cual ha sido documentado por el Programa de Glaciares Ecuatoriano. (Francou et al., 2000; Cáceres, 2002; Cáceres et al., 2006; Cáceres, 2008).

Para el caso del Cotopaxi por ejemplo se pudo evaluar una reducción del 31% en su cobertura de glaciares desde el año 1976 hasta 1997. (Cáceres, 2005). Para el caso del Glaciar 15 del Antisana se pudo evaluar una reducción en su área del 62.8% desde el año de 1956. Para el caso del Carihuayrazo se pudo evaluar una pérdida del 49.4% entre 1956 y 2006. (Cáceres et al., 2008).

3.2 Variaciones del balance de masa

El balance de masa provee una relación inmediata entre el glaciar y el clima circundante. El balance de masa describe de manera clara donde y cuando un glaciar está ganando o perdiendo masa debido a la predominancia ya sea de los procesos de acumulación o de ablación, los cuales tiene una relación directa con las variables climáticas tales como temperatura, precipitación, radiación solar, humedad, etc. (Kaser, 2002^a; Vuille et al., 2007; Francou et al., 2004).

Debido a la carencia de una estación termal pronunciada (la temperatura permanece más o menos constante a lo largo del año), la clara diferenciación entre la temporada seca y húmeda, el balance de masa sobre los glaciares tropicales y su sensibilidad a los cambios climáticos es diferente de lo que se observa en las medianas y altas latitudes (Kaser et al., 2002^b).

Debido a estas características del clima tropical, la acumulación está confinada a la estación húmeda sobre el trópico exterior o ocurre a lo largo del año en la parte interior de los trópicos, mientras que la ablación puede ocurrir a lo largo de todo el año. Contrariamente en los glaciares ubicados en las medianas latitudes donde la

acumulación y ablación están separadas en la temporada de acumulación de invierno y ablación de verano, sobre los trópicos la ablación y acumulación puede ocurrir al mismo tiempo. Si la temperatura no cambia mucho a lo largo del año, la ablación ocurre predominantemente sobre la zona de ablación, bajo la línea de equilibrio y la acumulación se encuentra restringida a las regiones ubicadas sobre la línea de nieve, la cual permanece más o menos constante a lo largo del año. Ver *Figura 3.2.* (Kaser, 1995; Kaser et al., 1996; Kaser et al., 1999).

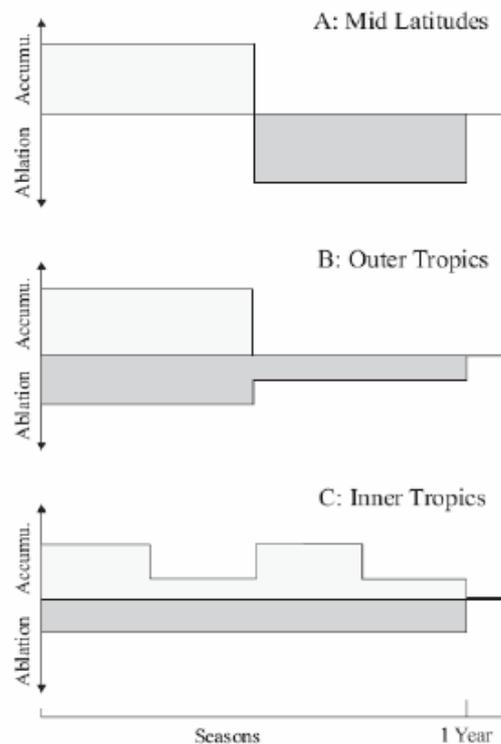


Figura 3.2. Comparación esquemática del balance de masa en medianas latitudes, parte interior de los trópicos y parte externa de los trópicos. (Kaser et al., 1999)

El balance de masa es obtenido a partir de las mediciones mensuales que se realizan sobre una red de estacas colocadas sobre la zona de ablación del glaciar y mediciones en la zona de acumulación. (Francoy et al., 2004)

El balance de masa b se lo determina mediante la diferencia entre la acumulación y la ablación que se han producido durante cierto intervalo de tiempo (generalmente un año hidrológico) y representa el cambio de masa que ha experimentado el glaciar.

Si el balance se expresa en términos de volumen equivalente de agua (sea en metros cúbicos o en milímetros de agua repartidos sobre toda la superficie del glaciar) se lo denomina como balance neto específico (bn), el que se lo puede definir utilizando la siguiente relación:

$$bn = \int Sc.bn.dS + \int Sa.bn.dS$$

Donde:

Sc es el área de la zona de acumulación.

Sa es el área de la zona de ablación.

bn representa el balance elemental en cada punto del glaciar.

Las mediciones del balance de masa sobre los glaciares ecuatorianos se iniciaron en el año de 1994, adicionalmente se han realizado algunas mediciones sobre las variaciones del volumen a partir de restitutiones fotogramétricas partiendo del año 1956 para el glaciar 15 del Antisana y cuatro glaciares del Cotopaxi. (Cáceres, 2000; Cáceres et al., 2005).

Los glaciares Andinos responden a la misma señal climática relacionada a la variación regional del ENOS. (Figura 3.3) (Francou et al., 2003; Francou et al., 2005; Francou et al., 2007). Para la última década del siglo XX, los glaciares andinos han perdido un mínimo de 0.5-0.6 m we/año. (Francou et al., 2007). Para un glaciar del Ecuador este valor como promedio se ubica alrededor de 0.6 m we/año (Figura 3.4). (Francou et al., 2004; Cáceres et al., 2006).

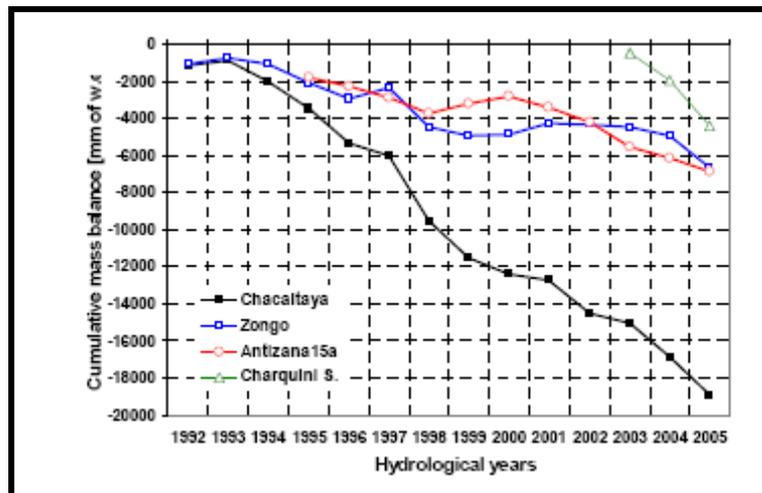


Figura 3.3. Balance de masa acumulado para tres glaciares sudamericanos. Francou et al. 2007

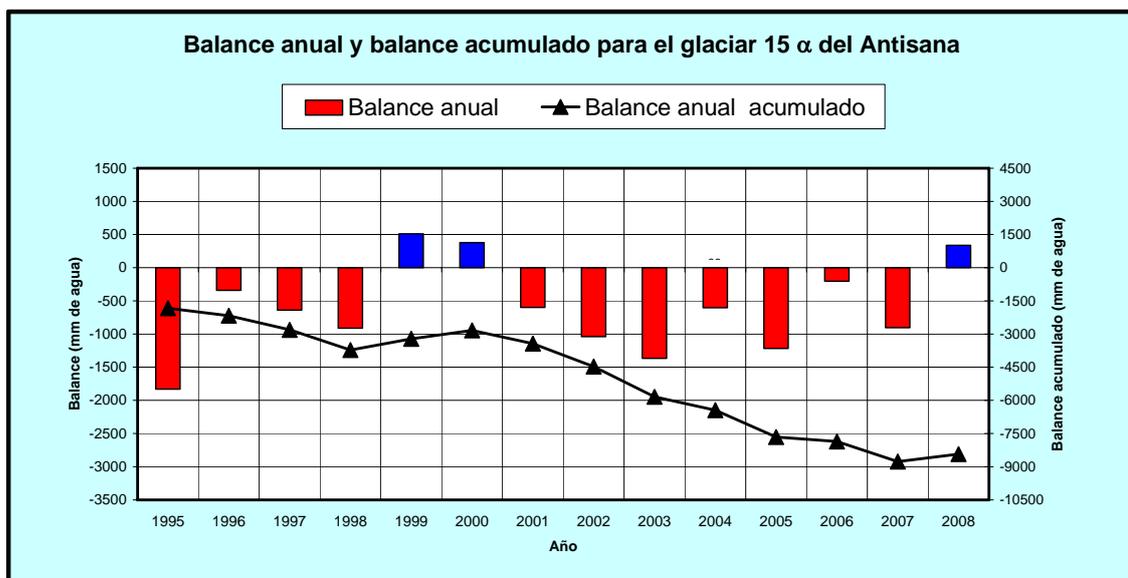


Figura 3.4. Balance de masa Glaciar 15 del Antisana período 1994-2008 Modificado de Cáceres et al. 2006

Sobre los glaciares del Ecuador, la ablación es intensa y ocurre a lo largo de todo el año, su variabilidad máxima se observa en los periodos abril-mayo y agosto-septiembre, es

decir en periodos cercanos a los equinoccios. A nivel de los procesos las diferencias entre lo que ocurre en la parte exterior del trópico (Bolivia 16⁰s) y el trópico interior (Ecuador 0⁰) no solo es influenciado por la estacionalidad de la ablación, sino también a los procesos responsables de su variabilidad interanual. (Francou et al., 2003; Francou et al., 2004).

Las mediciones continuas realizadas para el balance de masa en la zona de ablación sobre el glaciar 15 del Antisana entre enero de 1995 y diciembre de 2008 muestran una relación de dependencia con la ocurrencia del fenómeno ENSO. Durante los periodos del Niño se observa un balance bastante negativo a lo largo de todo el año, contrariamente en los periodos Niña se observa un balance más equilibrado y en algunos casos positivo. A escala estacional la ablación se mantiene más o menos constante a lo largo del año, pero la variación interanual muestra cambios mucho mayores de un año a otro. (Figura 3.5). (Cáceres et al., 2006; Francou et al., 2004).

Complementariamente se ha podido establecer que el balance de masa esta correlacionado negativamente con la temperatura superficial del mar en el Bloque Niño-4, observándose una estrecha correlación entre las tasas de ablación en la parte baja del glaciar (< 5000 m.s.n.m. y el indicador del Pacifico central (SST), estableciéndose un retardo de tres meses en la respuesta de los glaciares ecuatorianos a las perturbaciones ocurridas en el pacifico ecuatorial. Además se pudo establecer una correlación ($r=0.67$) entre las tasas de ablación y la temperatura de la atmósfera reanalizada en la altura del glaciar (500 hPa). (Figura 3.6). (Francou et al., 2004).

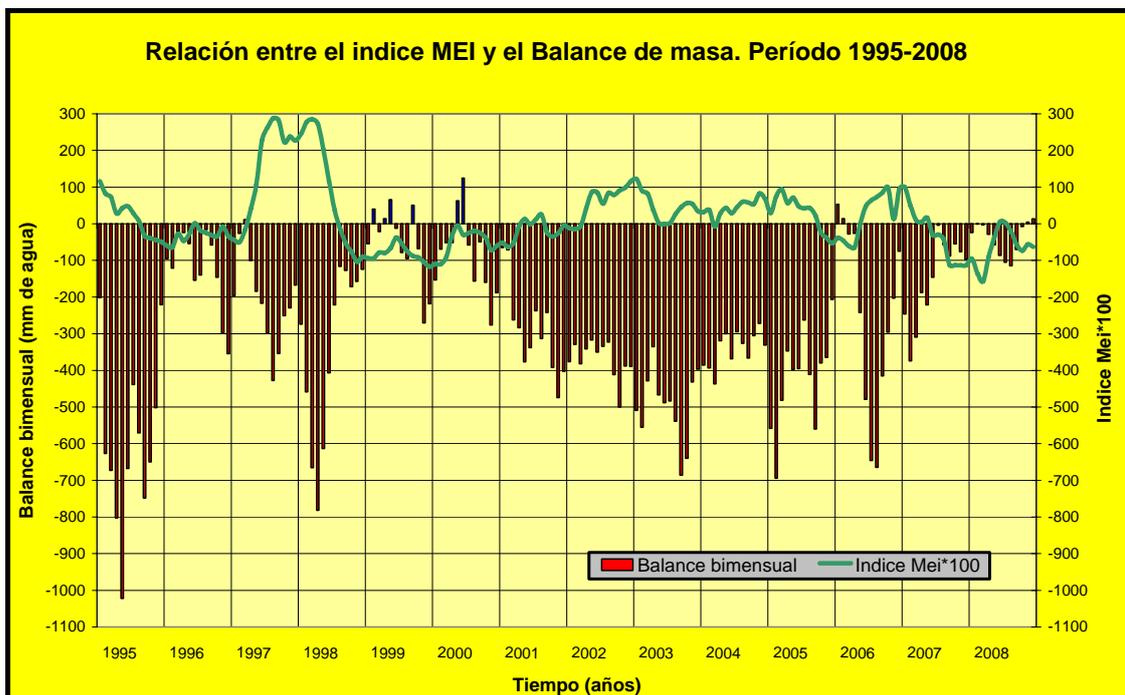


Figura 3.5. Relación entre el Balance de masa medido en el glaciar 15 del Antisana y el Índice MEI del Pacífico Ecuatorial. Modificado de Cáceres et al., 2006

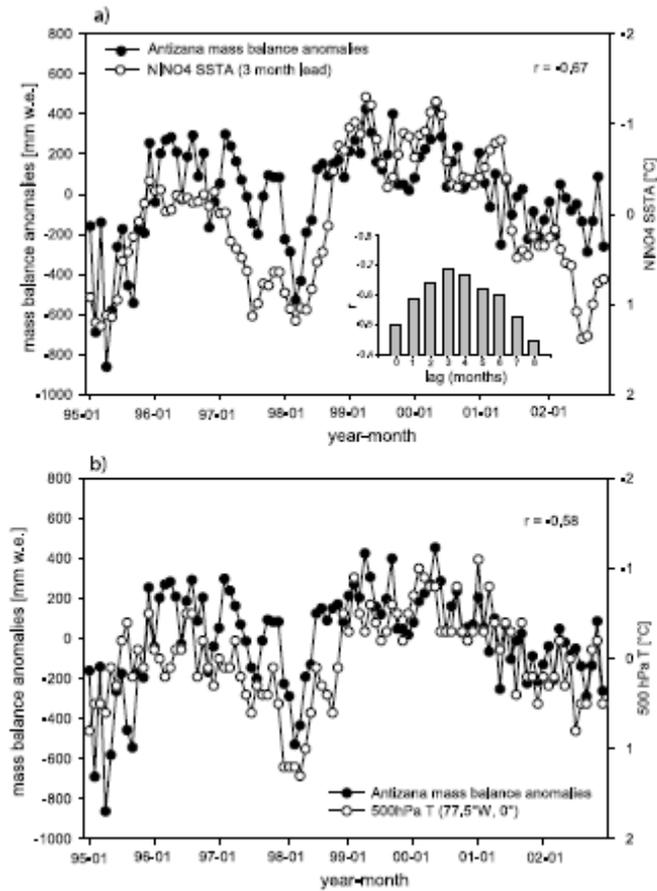


Figura 3.6. Correlación entre el balance de masa, la temperatura superficial del mar, y la temperatura reanalizada a 500 hPa. Francou et al. 2004

4 Inventarios de los glaciares en el Ecuador: estado del arte

4.1 Intentos parciales o completos de inventarios previos

Los primeros inventarios que se realizaron únicamente trataban de realizar una cartografía sobre las coberturas glaciares existentes a la fecha. Una de las primeras referencias que se tiene sobre un trabajo para inventariar las coberturas glaciares del Ecuador se la encuentra en los trabajos de Whymper el cual realiza una descripción sobre la cobertura glaciar del Chimborazo (*Whymper, 1892*).

Posteriormente Hans Meyer durante los primeros años del siglo 20 realiza un trabajo similar sobre el Chimborazo y Altar (*Meyer, 1907*). Ver *Figura 4.1*

Estos trabajos se basaron en observaciones directas en el campo, y la utilización de métodos documentales disponibles a la época (grabados, fotografías). Adicionalmente se realizaron algunas mediciones referentes a la ubicación altimétrica del límite de la nieve sobre los glaciares visitados. Estos datos y observaciones se los colocó sobre

cartas topográficas elaboradas con la tecnología disponible en la época. (Jordan et al., 2003)

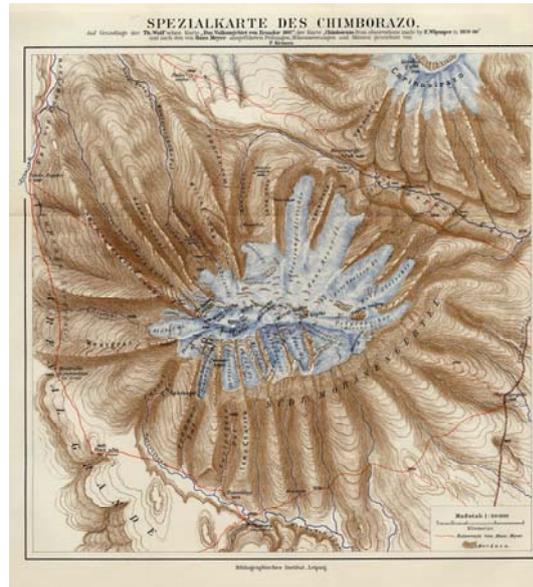


Figura 4.1. Mapa del Chimborazo (Hans Meyer). Jordan et al., 2003

Entre 1950 y 1975 el Dr. Walter Sauer realiza varios trabajos relacionados con el cuaternario y dentro de ellos incluye inventarios sobre las coberturas glaciares de los Andes del Ecuador (Sauer, 1950; Sauer, 1965; Sauer, 1971). Ver Figura 4.2

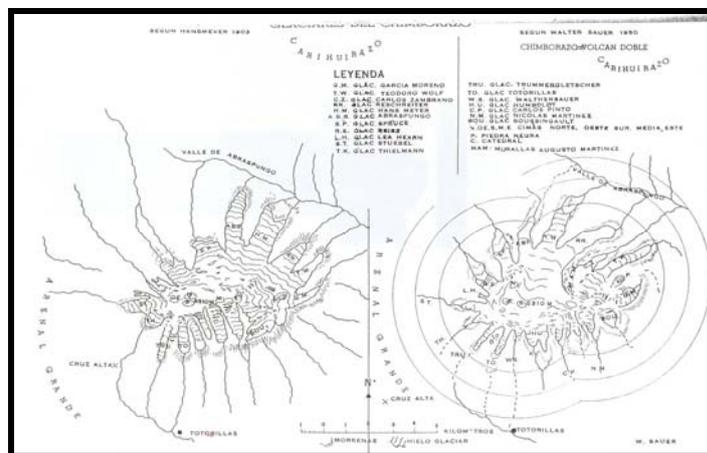


Figura 4.2. Mapa del Chimborazo. Sauer 1965

Hastenrath realizó el primer inventario de los glaciares de manera sistemática aunque no completa, para ello utilizó la tecnología de la época, la que permitió realizar evaluaciones aproximadas sobre las coberturas glaciares ya que no se disponía de puntos de control precisos sobre las zonas de estudio (Hastenrath, 1981), se emplearon únicamente puntos (aerotriangulados) obtenidos de las fotografías y cartografía existente a la época, hecho que se considera redujo de manera notable la precisión, además la resolución del método utilizado (interpretación fotogramétrica analógica y planimetría) no es lo suficientemente precisa para definir de manera exacta los parámetros de cada glaciar. Ver Figura 4.3

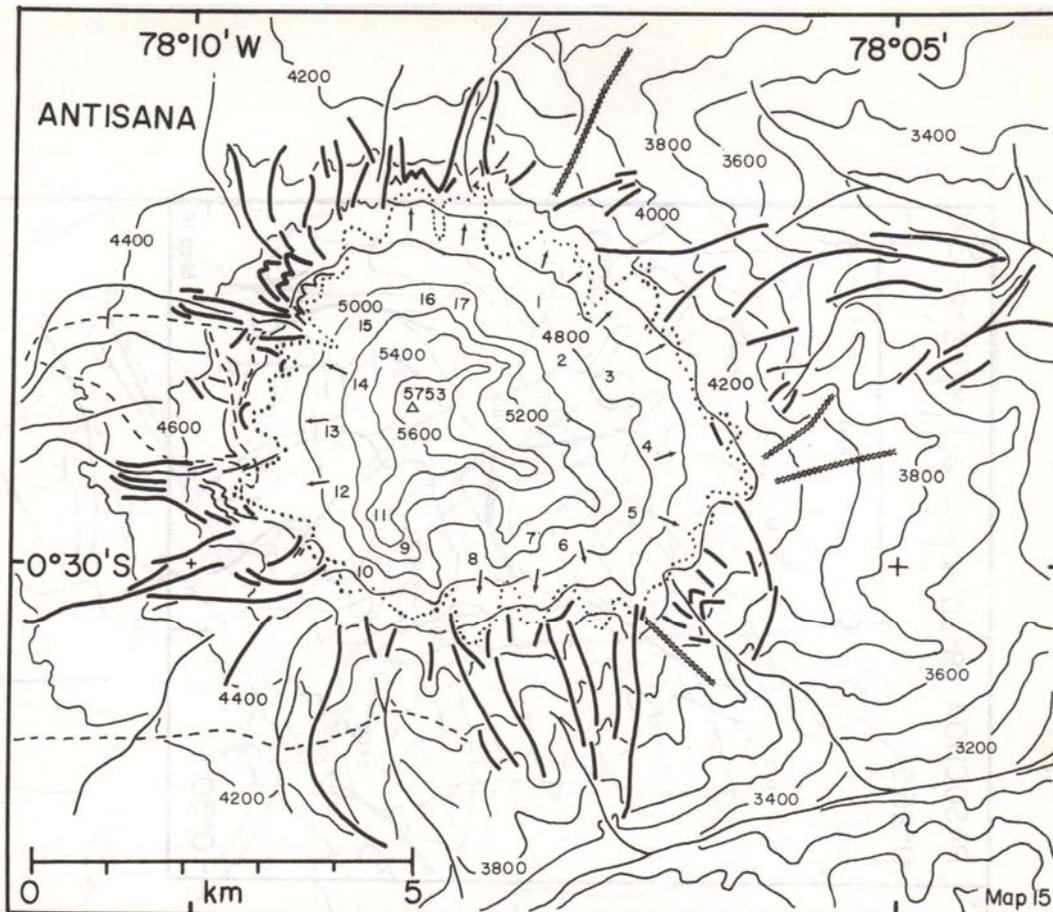


Figura 4.3. Inventario de los Glaciares del Antisana. Hastenrath 1981

Posteriormente a este primer intento en la década de los noventa se publica el primer inventario de los glaciares del Ecuador (Jordan et al., 1999), el cual completa al inventario anterior de mejor manera pero aun no se alcanza una resolución adecuada debido a los métodos de análisis empleados y a la ausencia de puntos de control precisos, también se utilizó para este inventario imágenes satelitales lo que mejoró de alguna manera las evaluaciones. Dicho trabajo de evaluación determinó que para este año la cobertura total de los glaciares en el Ecuador sea de 97.21 kilómetros cuadrados. (Jordan et al., 1999). Ver Tabla 4.1

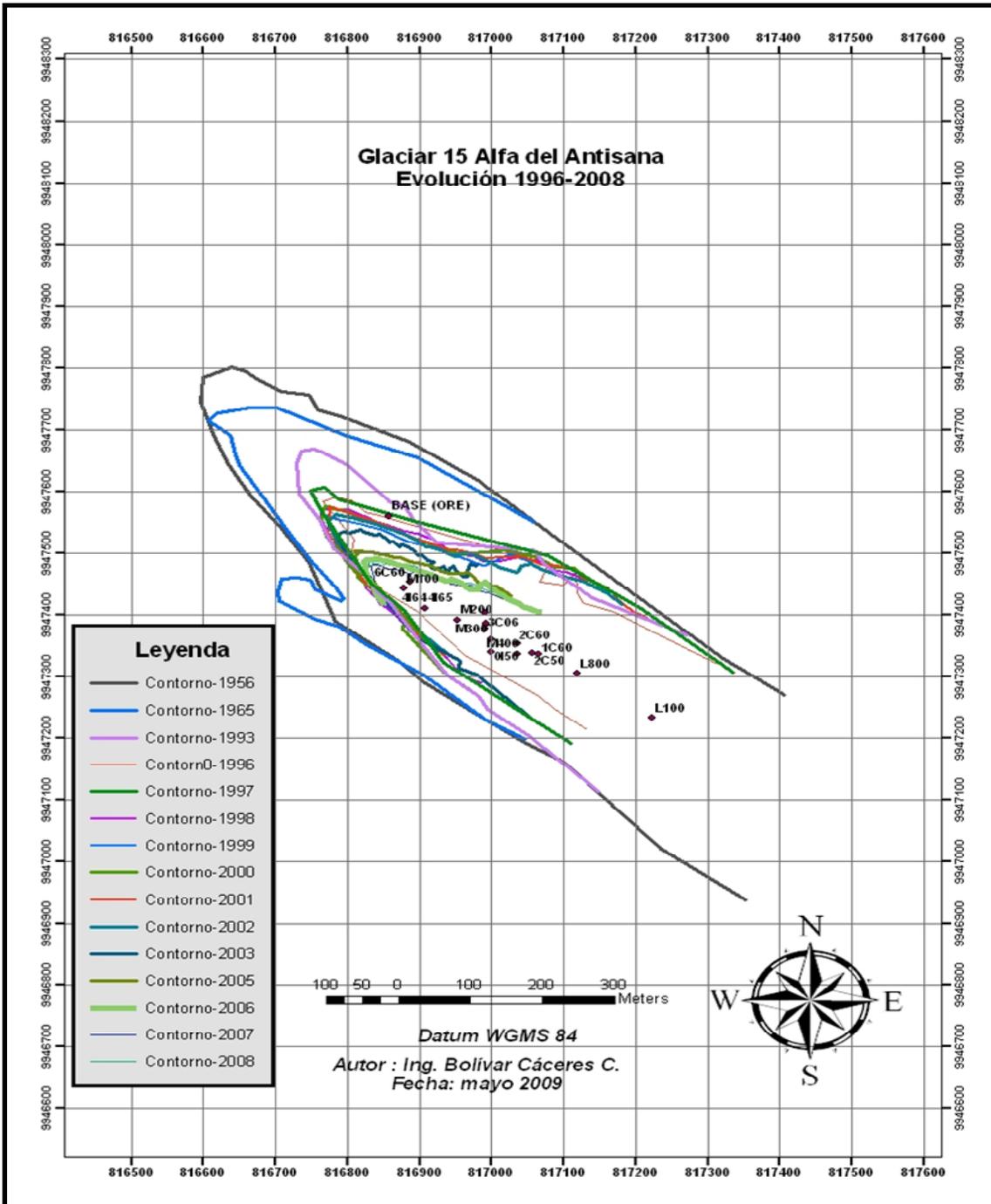
Mountain type	Locality	Latitude	Longitude (west)	Type of glacier(s)	Number of outlet glacier(s)	Area (square kilometers)	Highest elevation (meters)	Lowest glacier terminus (meters)
Cordillera Occidental (Western Cordillera)								
	Cordillera Occidental	0°22'N.-1°29'S.	78°20'-78°48'	--	--	--	6,310	4,600
IV	Cotacachi	0°22'N.	78°20'	Mountain	--	0.06	4,939	4,750
IV	Iliniza	0°39'S.	78°42'	Ice cap	10	.84	5,263	4,800
IV	Carihuairazo	1°24'S.	78°45'	Ice cap	9	.78	5,020	4,600
IV	Chimborazo	1°29'S.	78°48'	Ice cap	22	20.24	6,310	4,600
					Total	21.92		
Cordillera Oriental (Eastern Cordillera)								
	Cordillera Oriental	0°1'N.-2°20'S.	77°54'-78°33'	--	--	--	5,911	4,150
IV	Cayambe	0°1'N.	77°59'	Ice cap	20	17.73	5,790	4,200
IV	Saraurcu	0°4'S.	77°54'	--	--	.05	4,676	4,500
AV	Antisana	0°29'S.	78°08'	Ice cap	17	22.58	5,704	4,200
IV	Sincholagua	0°32'S.	78°22'	3 ice fields	--	.18	4,893	4,700
AV	Cotopaxi	0°41'S.	78°25'	Ice cap	23	19.09	5,911	4,400
IV	Quilindaña	0°47'S.	78°19'	2 mountain	--	.06	4,760	4,650
NVM	Cerro Hermoso	1°17'S.	78°17'	Mountain	--	.02	4,640	4,600
AV	Tungurahua	1°28'S.	78°26'	Ice cap	--	.78	5,016	4,800
IV	Altar	1°40'S.	78°24'	Ice cap, 3 mountain	6	14.80	5,319	4,150
IV	<i>Cubillin</i>	--	--	--	--	--	--	--
AV	Sangay	1°58'S.	78°20'	Snowpack or ice cap ?	--	3.32	5,230	--
NVM	Collay	2°14'S.	78°32'	--	--	--	4,630	--
NVM	Cerro Ayapungo (<i>Soroche</i>)	2°20'S.	78°33'	--	--	--	4,730	--
					Total	75.29		
					Grand total	97.21		

Tabla 4.1. Inventario de los glaciares del Ecuador. Jordan et al., 1999

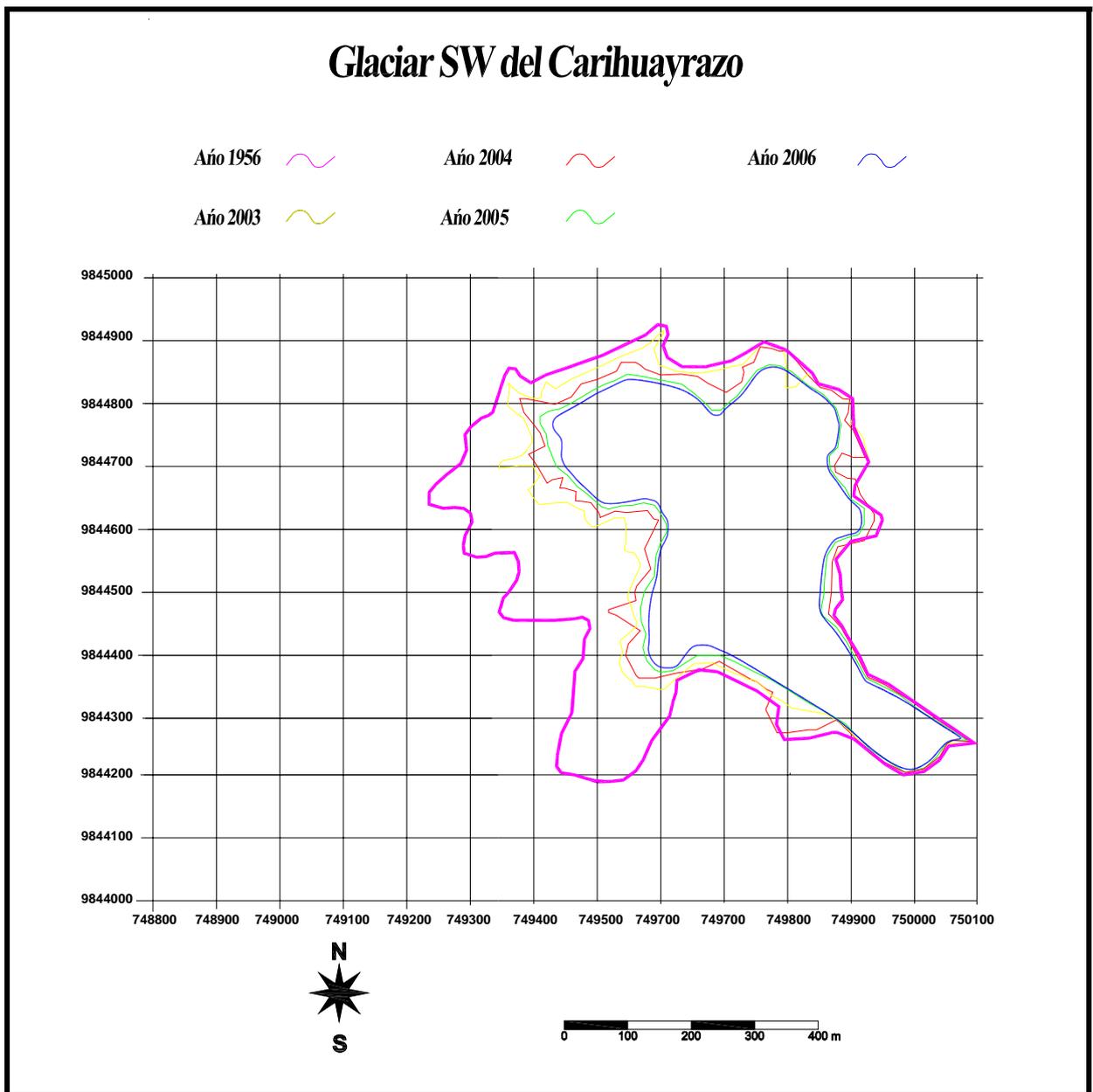
El primer inventario sistemático sobre los glaciares del Ecuador fue publicado en los años 90 toma como base los trabajos de Hastenrath 1981 y Jordan et al. 1998 siendo hasta la fecha la única recopilación sistemática sobre las características de los glaciares ecuatorianos, esta toma en cuenta los parámetros usados por el World Glacier Monitoring Service (WGMS) y que se los aplica a las coberturas glaciares a nivel mundial. Dicho inventario esta publicado en el sitio del WGMS.

4.2 Glaciares actualmente estudiados

A partir de 1998 hasta la actualidad en el marco del Programa Glaciares Ecuador se ha realizado mediciones sobre cartografía glaciaria sobre dos glaciares del Antisana (Glaciar 15 y Los Crespos), un Glaciar del Carihuayrazo (SW) y el Cotopaxi. Complementariamente se ha realizado la medición de puntos de control de alta precisión en los alrededores de las coberturas glaciares del Antisana, Cotopaxi, Chimborazo y Carihuayrazo (Cáceres, 2002; Cáceres 2006). Ver Figura 4.4 y Figura 4.5.



*Figura 4.4. Cartografía del glaciar 15 del Antisana
Modificado de Cáceres 2002*



*Figura 4.5. Cartografía del glaciar SW del Carihuayrazo
Cáceres et al. 2006*

5 Metodología de trabajo

Para el presente trabajo se utilizaron fotografías aéreas en color tomadas durante los meses de febrero-marzo de 1997 en el marco de un Proyecto especial por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en cooperación con el Instituto de Geografía de la Universidad Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, y fotografías tomadas en el año 2006 para el área del volcán Cotopaxi.

Para el análisis de estas fotografías se seleccionó un software que ofrezca las mejores condiciones de interpretación en comparación con los métodos semi-analíticos o

analíticos tradicionales de evaluación, para ello se consideraron aspecto tanto técnicos como económicos.

Se consideraron los siguientes pasos:

1. Medición de puntos de control sobre el campo, los cuales fueron medidos por un técnico del INAMHI y la cooperación de personal del IRD (Ver *Figura 5.1*, ejemplo) mediante la utilización de un sistema de posicionamiento satelital en modo diferencial (DGPS Pro Mark 2) durante los meses de marzo y mayo del 2002, enero y abril del año 2003, obteniéndose mediciones de alta precisión con una precisión centimétrica . Dichos puntos fueron levantados en el sistema WGS 84. (Cáceres, 2003; Cáceres et al., 2004).

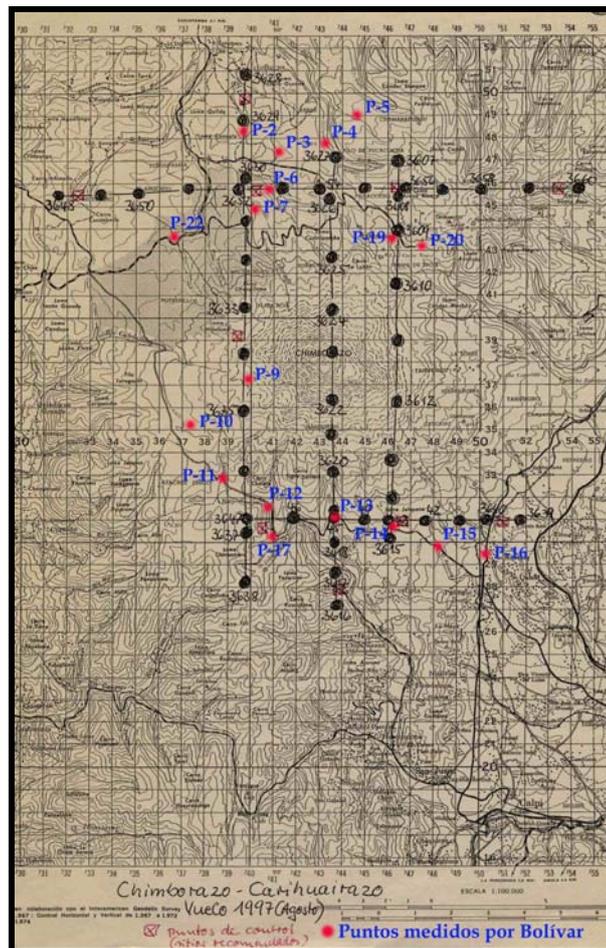


Figura 5.1. Puntos de control medidos en el nevado Chimborazo. Cáceres 2003

2. Tratamiento de las fotos usando un software para la realización de la fotogrametría digital la cual permite tener mayores posibilidades de interpretación comparada con los métodos tradicionales sean estos analíticos o semi-analíticos. Para introducir las imágenes en el software fotogramétrico seleccionado, estas deben ser previamente escaneadas. Para ello, se utilizó el escáner fotogramétrico ZI-Imagescann 2001. Como resultado de este proceso se obtuvieron imágenes con una excelente calidad digital, estas presentan una alta precisión geométrica ($3 \mu\text{m}$ de error), un buen contraste y una alta resolución ($14 \mu\text{m}$). Ver *Tabla 5.1*. (Jordan et al., 2005; Cáceres, 2003).

Resolution [dpi]	150	300	600	1200
Resolution [μm]	169,33	84,67	42,33	21,17
Image size ca. [MB]	2	8	32	128
Image scale				
1: 5000	0,847 m	0,423 m	0,212 m	0,106 m
1:10000	1,693 m	0,847 m	0,423 m	0,212 m
1:15000	2,540 m	1,270 m	0,635 m	0,317 m
1:20000	3,386 m	1,693 m	0,846 m	0,424 m
1:25000	4,233 m	2,117 m	1,058 m	0,529 m
1:30000	5,080 m	2,540 m	1,270 m	0,634 m
1:40000	6,772 m	3,386 m	1,693 m	0,846 m
1:50000	8,466 m	4,234 m	2,116 m	1,059 m
Pixel size in terrain units				

Tabla 5.1. Resolución de las fotografías utilizadas. Linder 2009

3. Trabajo digital sobre las fotografías previamente escaneadas en el paso anterior utilizando el software LISA- FOTO 4.0 ® con sus respectivos módulos (desarrollado por el Dr.rer.nat. Dr-Ing. Wilfried Linder Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, Alemania; Cáceres, 2003). Este proceso resultó exitoso terminando con la orientación interna de las fotografías. Este resultado puede ser considerado como bueno (1/3 pixel RMSE).
4. Los puntos medidos sobre el campo son ubicados y medidos sobre las fotografías, así como puntos adicionales de conexión comunes en un número de 24 como mínimo en cada par estereoscópico de fotos (Ver *Figura 5.2*), para ello se utilizó el programa IMATIE ® (desarrollado por Dr. Michael Braitmeier Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf Alemania). En todos los casos los puntos de conexión fueron transferidos en al menos dos pares adicionales de fotos (Ver *Figura 5.3* y *Figura 5.4*). Al final de todo el proceso, cada punto de conexión tiene una sobre determinación matemática la cual es usada más adelante en los cálculos, este valor debe ser muy pequeño. (Linder, 2006; Jordan et al., 2005; Cáceres, 2003) debido a la alta resolución de las fotografías empleadas se pueden identificar objetos de hasta 60 centímetros, lo que permite ubicar los puntos de manera bastante precisa, sin embargo a veces se hizo difícil o imposible la determinación de la localización de un punto con un pixel de precisión debido a la complejidad del terreno estudiado y a la ausencia de algún tipo de infraestructura, en el presente trabajo se alcanzaron precisiones de 5 metros en horizontal y 1 metro en vertical, la cual es suficiente para los objetivos del proyecto.

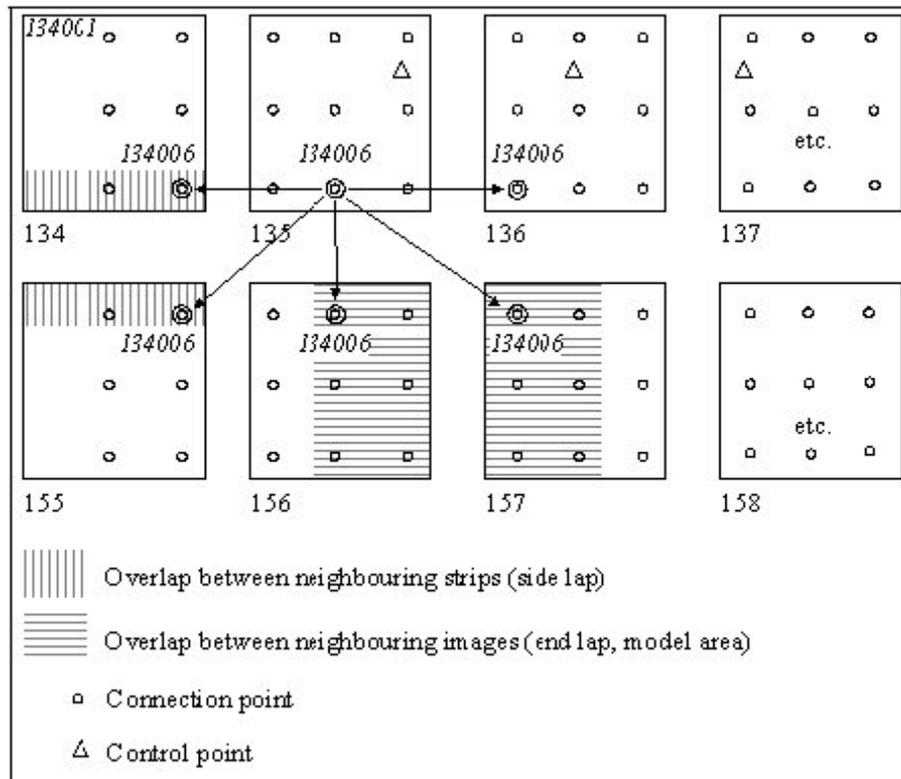


Figura 5.2. Distribución de los puntos de conexión Gruber. Linder 2006

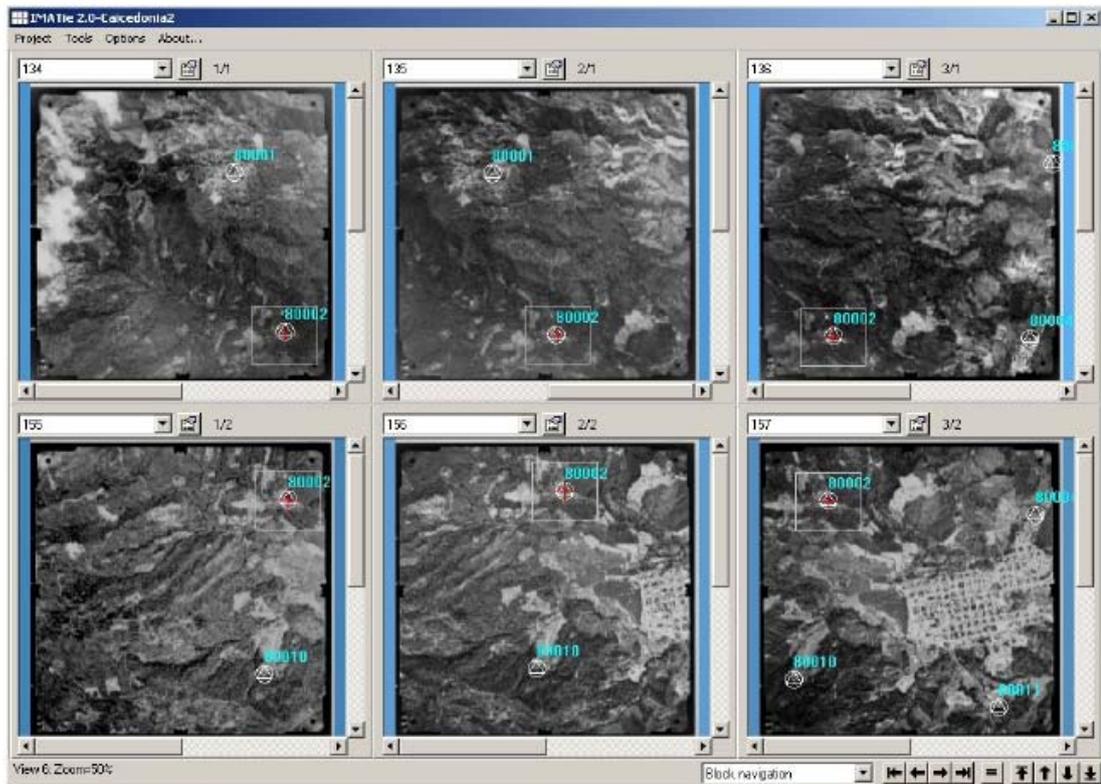


Figura 5.3. Visión general de una línea de análisis. Linder 2006

Number	Type	X	Y	Z
80001	Full	1136080.500	968916.500	1427.800
80002	Full	1137755.400	969523.500	1212.200
80003	Full	1135875.000	971998.000	1089.800
80004	Full	1137860.000	971648.000	1149.000
80005	Full	1135318.500	974301.400	1056.200
80006	Full	1137369.500	973844.200	1120.400
80010	Full	1139516.400	969242.000	1327.200
80011	Full	1139925.700	971286.900	1118.800
80012	Full	1139862.300	973097.900	1108.700
80013	Full	1141648.200	969138.500	1133.800
80014	Full	1141901.100	973031.800	1080.900

Figura 5.4. Puntos de control ingresados con sus respectivas coordenadas

Posterior a estas mediciones se procede a calcular un bloque de ajuste y a realizar la aerotriangulación (ver Figura 5.5 y Figura 5.6, ejemplo del nevado Chimborazo) tomando en cuenta todos los datos procesados anteriormente, para ello se utilizó los programas BLUH® (Dr. Carsten Jacobsen, IPI Hannover-Alemania) y BINGO 4.0® (Dr. Erwin Krug) usados en la Universidad Heinrich Heine de Dusseldorf, Alemania. La información aquí generada permitió medir los objetos con sus coordenadas reales. El bloque de ajuste así generado permite realizar mediciones con una precisión típica de tres metros en vertical y cinco metros en horizontal, (Jordan, et.al., 2005; Cáceres 2003).

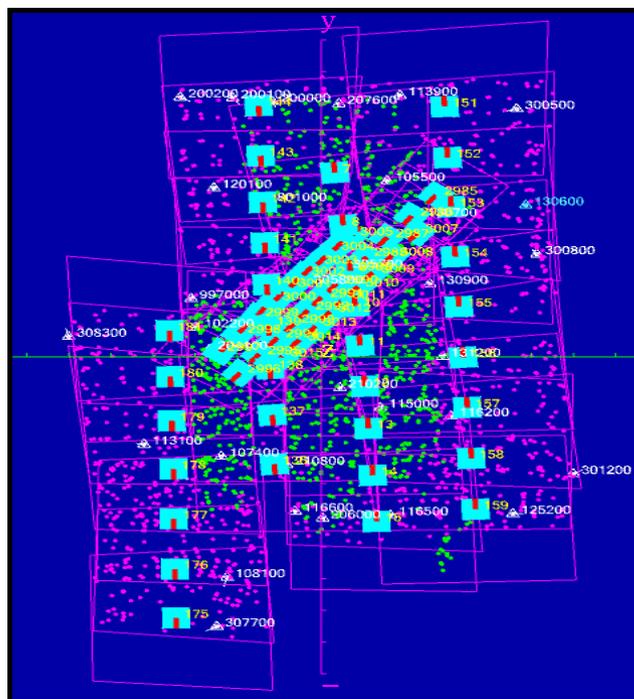


Figura 5.5. Bloque de ajuste para el Nevado Chimborazo. Cáceres 2003

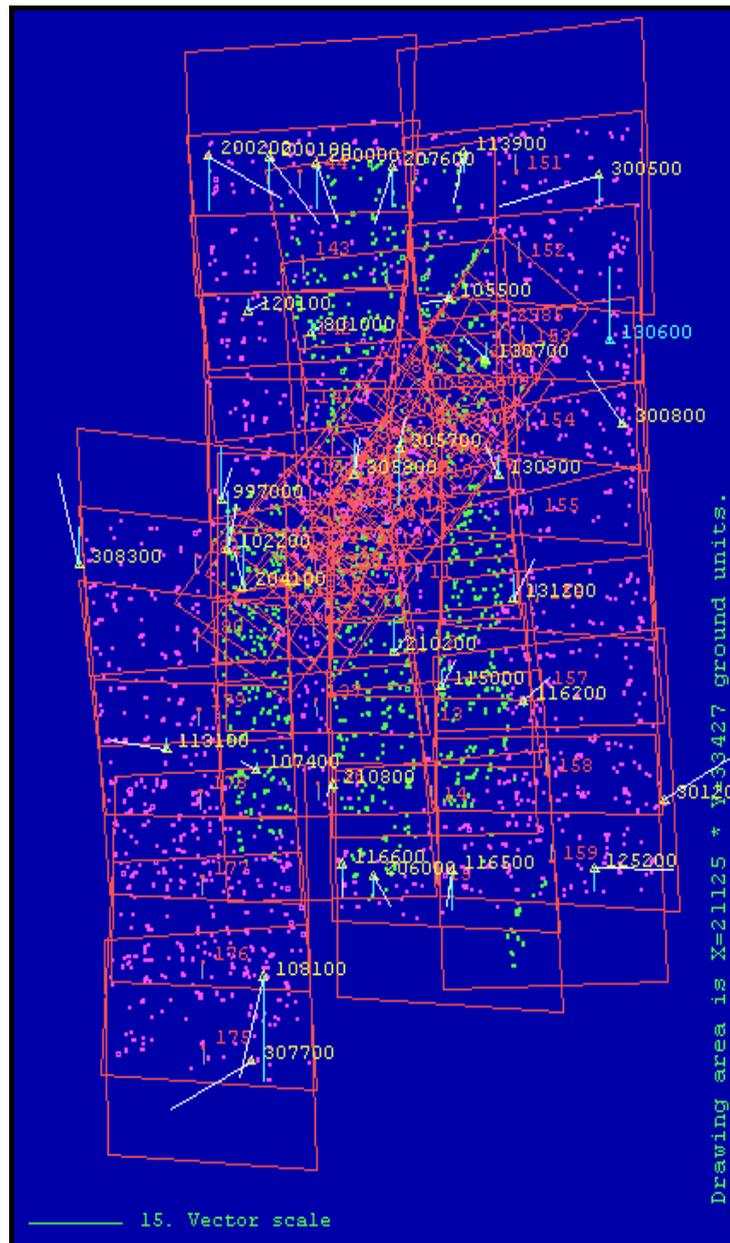
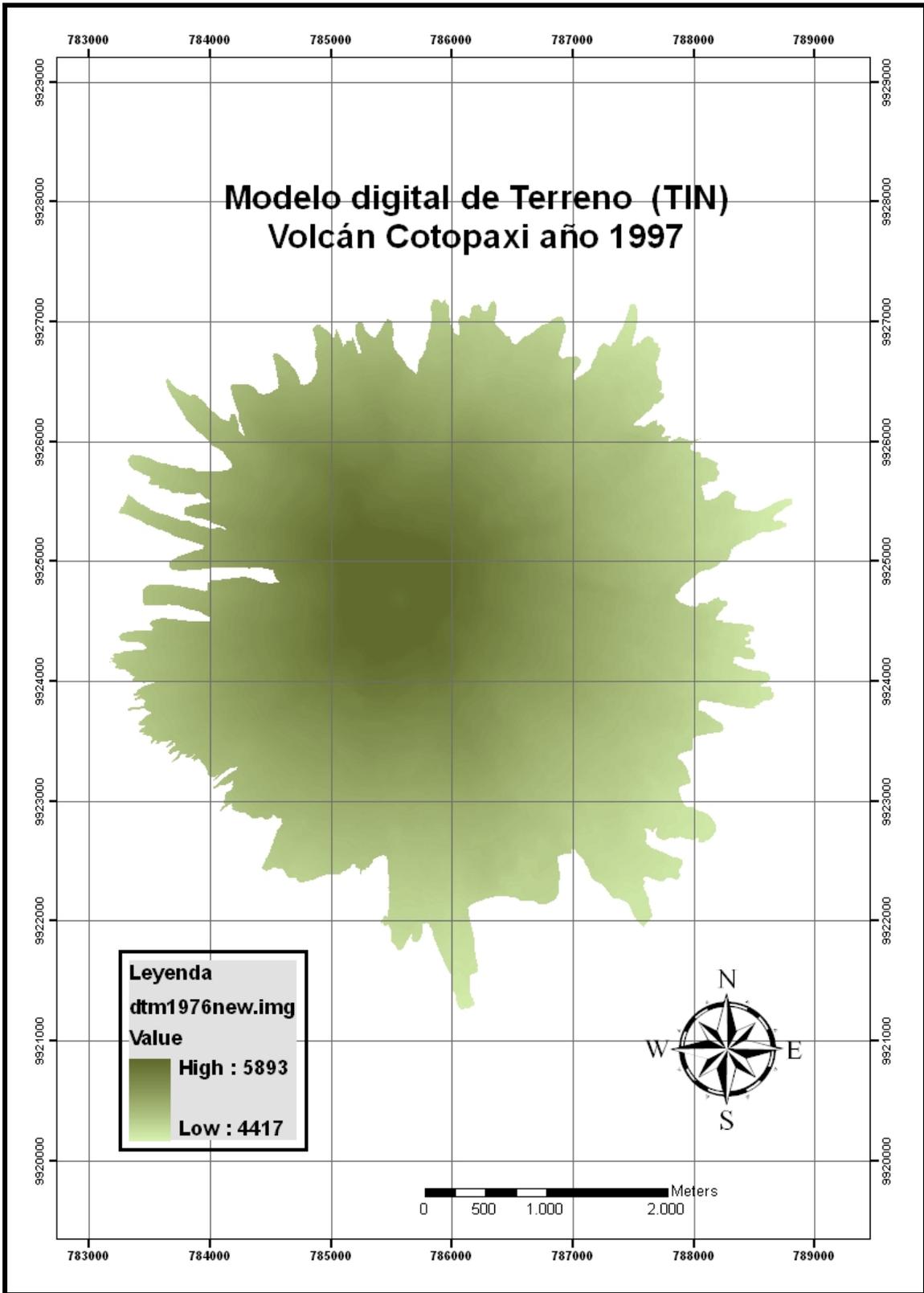


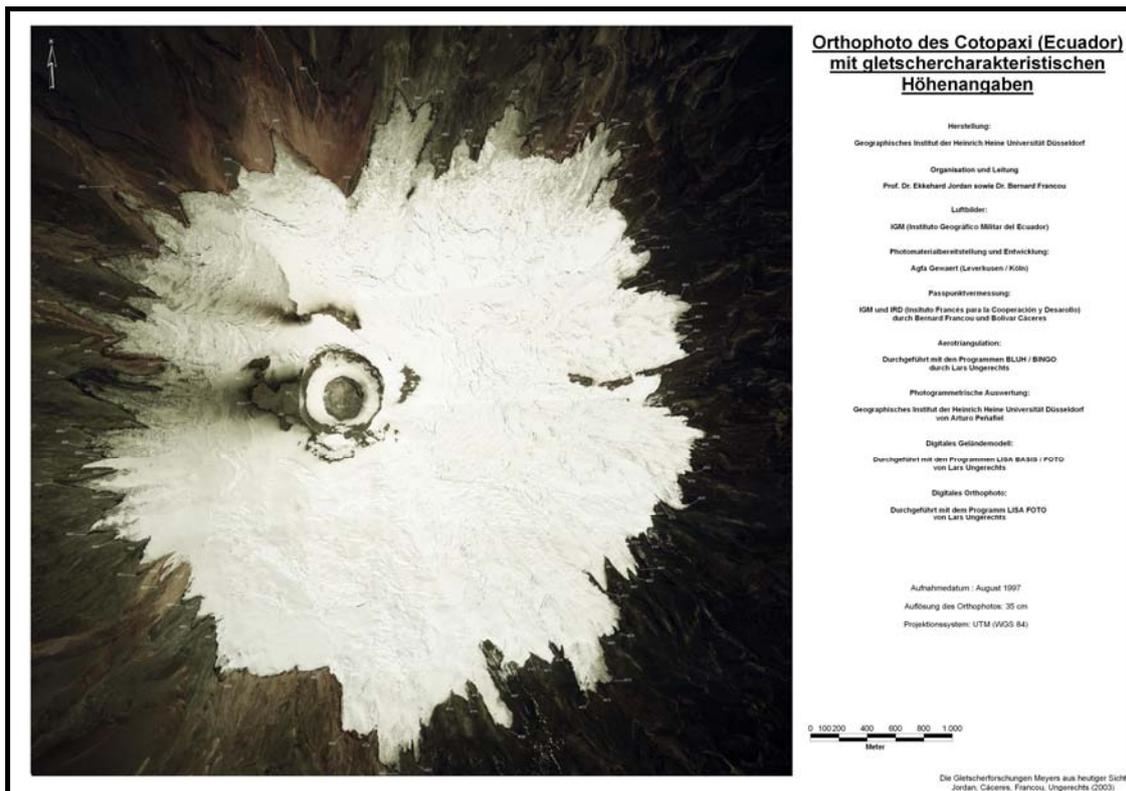
Figura 5.6. Aerotriangulación para el Nevado Chimborazo. Cáceres 2003

- Se procede a medir de manera tridimensional las coordenadas sobre la imagen ajustada, sobre la fotografía correspondiente al año de interés con una precisión de medio metro con la finalidad de hacer una descripción completa de la superficie del glaciar y sus zonas más cercanas. Para las zonas aledañas al glaciar se realizó una estéreo correlación automática sin la necesidad de la intervención de un operador, obteniéndose una precisión adecuada para el presente proyecto, los algoritmos utilizados por el Programa empleado no permitieron obtener buenos resultados sobre la zona del glaciar debido al pobre contraste que se tiene sobre el glaciar, se obtuvieron diferencias en altura muy grandes del orden de decenas de metros, lo que condujo a la realización de una medición manual en estas zonas con la intervención de un operador. En base a estos puntos, se generó un modelo digital de terreno usando una interpolación TIN, se considera que se tiene un error de 5 metros. (Ver Figura 5.7, ejemplo del volcán Cotopaxi) (Jordan et al., 2005; Cáceres, 2003).



*Figura 5.7. Interpolación TIN, volcán Cotopaxi año 1997
Cáceres 2003, Jordan 2003*

6. De este trabajo se derivó una ortofoto en color para el año de 1997, sobre ésta se midieron los valores representativos de altura para cada una de las lenguas glaciares y los límites de su contorno (ver *Figura 5.8*, ejemplo del volcán Cotopaxi), lo cual permitió realizar el posterior estudio y análisis de sus características principales (áreas, longitudes, etc.) para ello se utilizó los paquetes ArGis 9.2 y Autocad este trabajo únicamente se lo realizó para el caso del Volcán Cotopaxi, y Chimborazo. Para el caso del Antisana el trabajo se lo realizó hasta la obtención del bloque con una precisión suficiente para evaluar los límites de la cobertura glaciar. (Cáceres, 2003; Cáceres et. al., 2004; Jordan, 2005; Cáceres, 2008; Cáceres 2007).



*Figura 5.8. Ortofotografía para el Cotopaxi año 1997
Cáceres 2003, Jordan 2003*

7. Para el caso del Glaciar del Carihuayrazo el trabajo se lo realizó tomando como base los levantamientos directos sobre el terreno (Ver *Figura 5.9*). Los demás glaciares (Altar, Cayambe) únicamente fueron evaluados mediante una proyección utilizando los resultados del Cotopaxi, que es el mejor estudiado. (Cáceres et. al., 2006; Jordan, 2005; Cáceres, 2008; Cáceres, 2007).

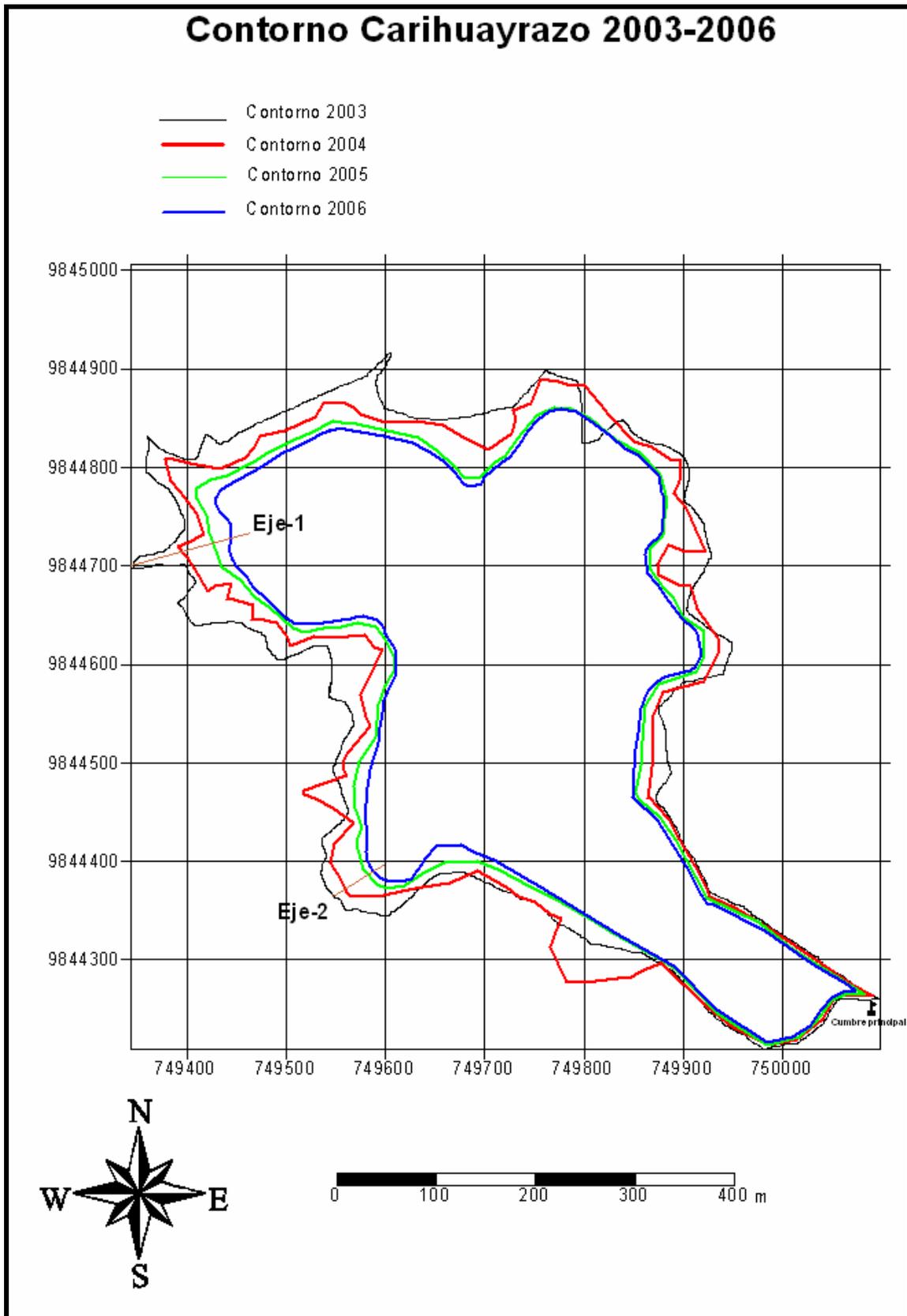


Figura 5.9. Evolución del Glaciar SW del Antisana. Cáceres 2007

8. La evaluación para los glaciares estudiados se la realizó utilizando la metodología propuesta por el World Glacier Monitoring Service (Muller et al., 1978, a y b). Esta base de datos se la inició en el año de 1986 año en el que se han establecido los

parámetros a ser considerados sobre cada uno de los glaciares. Este sistema de monitoreo funciona bajo el auspicio del Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente y otras organizaciones internacionales. (Haeberli, 1998; Haeberli et al., 1992). Los glaciares ecuatorianos forman parte de este inventario y actualmente uno de ellos (Antisana 15) está considerado dentro de los 20 glaciares de referencia alrededor del mundo. (WGMS 2007).

Los parámetros que se evaluaron para los tres casquetes glaciares motivo del presente trabajo son los siguientes:

- Número del glaciar
- Nombre del glaciar
- Latitud
- Longitud
- Coordenadas
- Número de cuencas
- Año de la topografía
- Escala de la topografía
- Año de la foto
- Área total
- Precisión de la medición del área
- Área en el sitio
- Área expuesta
- Ancho principal
- Longitud principal
- Máxima longitud
- Máxima longitud expuesta
- Máxima longitud de ablación
- Orientación del área de acumulación
- Orientación del área de ablación
- Máxima altitud
- Elevación media
- Mínima altitud
- Mínima altitud expuesta
- Altitud media de acumulación
- Altitud media de ablación
- Clasificación
 - Clasificación primaria
 - Forma
 - Características del frente
 - Longitud del perfil
 - Principal fuente de alimentación
 - Actividad de la lengua
- Código de las morrenas
 - Morrenas tipo 1
 - Morrenas tipo 2
- Periodo de observación, (desde)
- Periodo de actividad observado (hasta)
- Elevación de la línea de equilibrio
- Precisión de la línea de equilibrio
- Fecha de establecimiento de la línea de equilibrio

- Profundidad principal
- Precisión de la medición de la profundidad

Ref: WGMS web site: http://nsidc.org/data/glacier_inventory/

9. Para la evaluación de la línea de equilibrio (Equilibrium Line Altitude o ELA) se utilizó el valor correspondiente al área promedio de acumulación (AAR₀) medida sobre el glaciar 15 del Antisana desde el año de 1995 y que se considera es el valor representativo para los glaciares del Ecuador, al realizar el análisis de los datos obtenidos se encuentra un coeficiente de correlación de 0.84, el cual nos indica que este refleja de manera bastante real la evolución de este parámetro (ver *Figura 5.10*) al momento no se dispone de otro valor sobre la línea de equilibrio para los glaciares del Ecuador. (Cáceres et al., 2010). Este porcentaje (72.42) se lo aplica a cada una de las áreas correspondientes a las lenguas glaciares definidas sobre un casquete específico, se procede a ubicar la curva de nivel correspondiente sobre la topografía de base usando el software Arcmap9.3 y se ajusta el valor correspondiente al 72.42% del área total, de esta manera se ubica la posición de la línea de equilibrio para cada segmento glaciar.

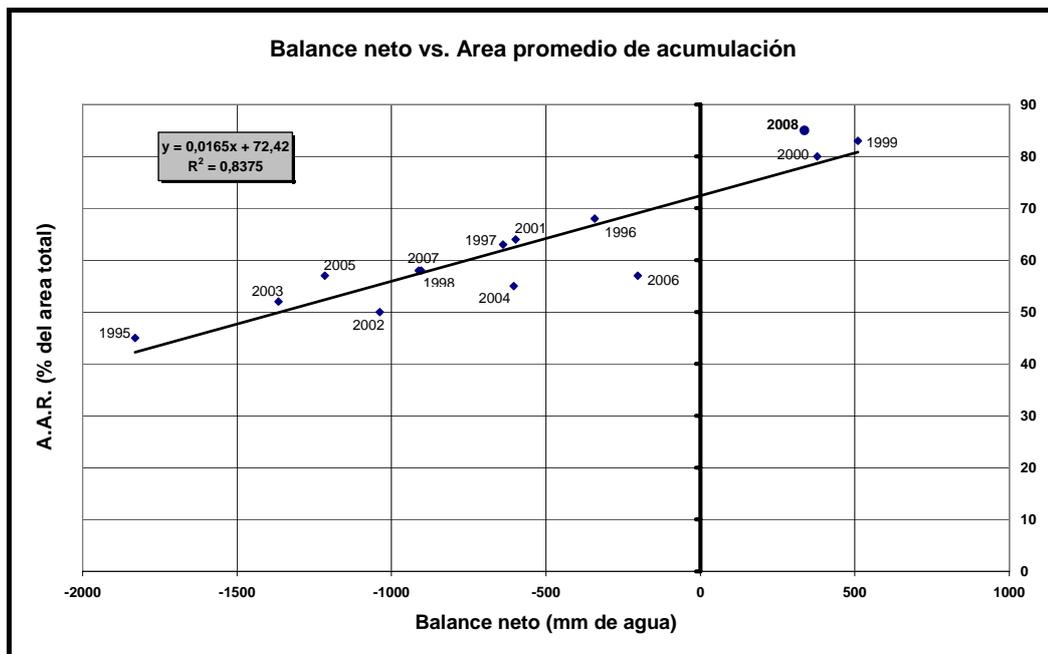


Figura 5.10. Área promedio de acumulación para el glaciar 15 del Antisana Modificado de Cáceres et al. 2008

6 Resultados

6.1 Volcán Cotopaxi

6.1.1 Inventario actualizado foto 2006

La interacción entre un evento volcánico y un glaciar es un proceso bastante complejo. (Thouret, 1990)

En el caso del Cotopaxi, cuando se ha producido este fenómeno, existen evidencias de que grandes lahares bajaron por sus estribaciones llegando inclusive su afectación hasta la costa. (Hall et al., 1994; Hall et al., 2004; Mothes et al., 1998) Esta la razón para que este volcán haya recibido especial atención al ser estudiado. Se hace necesario conocer de la manera más exacta posible su cobertura glaciar y su espesor, con la finalidad de poder prever los volúmenes laharíticos que bajarían por sus flancos (Mothes et al., 1998) hecho que afectaría de manera importante a la infraestructura que se halla en su zona de influencia así como a un importante segmento de población. (Cáceres et al. 2004; Mothes, 2004).

Con esta finalidad se realizó el inventario y evaluación de su cobertura glaciar utilizando la fotografía aérea mas reciente disponible la cual fue realizada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) en el mes de mayo de 2006.

Para ello se realizó una restitución de alta precisión en escala 1:5000, para lo cual se midieron alrededor de 100000 puntos sobre la zona glaciar, para las zonas aledañas se utilizó una estéreo correlación automática.

Como base se utilizaron los puntos de control medidos durante los años 2002-2003 y la aerotriangulación correspondiente a la fotografía de 1997. (Cáceres 2003, Jordan et al., 2005; Cáceres 2004).

Utilizando la metodología descrita se realizó la evaluación del casquete glaciar del Cotopaxi siguiendo las recomendaciones del Servicio de Monitoreo mundial de Glaciares (WGMS), se evaluaron para cada glaciar treinta y cinco parámetros (35), obteniéndose los resultados que se detallan a continuación., sobre la *Tabla 6.1* de parámetros del casquete glaciar del Cotopaxi (a,b,c y d) y la *Figura 6.1*.

Se obtuvo una cobertura glaciar de 11.84 km² repartidos sobre las 19 lenguas existentes, ver *Figura 6.2*. Se generó una ortofotografía de alta resolución, ver *Figura 6.3*. Se generó la topografía correspondiente a escala 1:5000 y se realizó la correspondiente evaluación de cada uno de los parámetros. Para el caso de la línea de equilibrio se la ubicó usando el valor del área promedio de acumulación (AAR₀) aplicada a cada uno de las lenguas definidas (Cáceres, 2008; Ginot et al., 2009; B. Francou, comunicación personal).

Se debe tomar en cuenta que AAR₀ se lo utiliza para la determinación de ELA₀ suponiendo que el glaciar se encuentra en estado de equilibrio, para el caso de los

glaciares ecuatorianos se conoce que estos no están en equilibrio, pero podemos asumir que debido a la morfología bastante empinada y sencilla de los casquetes glaciares ecuatorianos el error que se comete al tomar AAR_0 para obtener la línea de equilibrio no es muy alto.

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Latitud	Longitud	Area total (km ²)	Area en el sitio (km ²)	Area expuesta (km ²)	Longitud media (km)	Profundidad media (m)
EC1Q0005002	SINDIPAMPA	-0.680500	-78.427800	0,4927	0,4927	0,4927	1,5200	42
EC1Q0005004	CARERO MACHAY	-0.680500	-78.427800	0,7228	0,7228	0,7228	1,7590	42
EC1Q0005003	POTRERILLOS	-0.680500	-78.427800	1,0695	1,0695	1,0695	2,0630	42
EC1Q0005001	PUCAHUAYCU NORTE	-0.680500	-78.427800	0,6777	0,6777	0,6777	2,0200	42
EC1Q0005022	MUDADERO	-0.680500	-78.427800	0,8436	0,8436	0,8436	2,1610	42
EC1Q0005021	CAJAS	-0.680500	-78.427800	0,9095	0,9095	0,9095	2,1950	42
EC1D3035001	TAMBOYACU	-0.680500	-78.427800	0,8578	0,8578	0,8578	2,0540	42
EC1D3035002	MANANTIAL	-0.680500	-78.427800	0,9405	0,9405	0,9405	2,4810	42
EC1D3035003	TAMBO	-0.680500	-78.427800	1,2467	1,2467	1,2467	2,3190	42
EC1D3035004	CHURRUMIHURCO	-0.680500	-78.427800	0,9638	0,9638	0,9638	1,7250	42
EC1D3035005	SIMARRONES	-0.680500	-78.427800	0,4102	0,4102	0,4102	1,6280	42
EC1D3035006	EL PICACHO	-0.680500	-78.427800	0,3171	0,3171	0,3171	1,6220	42
EC1D3035007	SAQUIIMALA	-0.680500	-78.427800	0,4824	0,4824	0,4824	1,8370	42
EC1D3035008	SAN LORENZO	-0.680500	-78.427800	0,1557	0,1557	0,1557	1,6530	42
EC1D3035009	CAPULI-HUAICU	-0.680500	-78.427800	0,2574	0,2574	0,2574	1,4490	42
EC1D3035010	PUCAHUAYCU OESTE	-0.680500	-78.427800	0,1764	0,1764	0,1764	1,4090	42
EC1D3035011	CHANCHUNGA SUR	-0.680500	-78.427800	0,5396	0,5396	0,5396	1,6650	42
EC1D3035012	CHANCHUNGA NORTE	-0.680500	-78.427800	0,2976	0,2976	0,2976	1,5320	42
EC1D3035013	YANASACHA	-0.680500	-78.427800	0,4640	0,4640	0,4640	1,8860	42

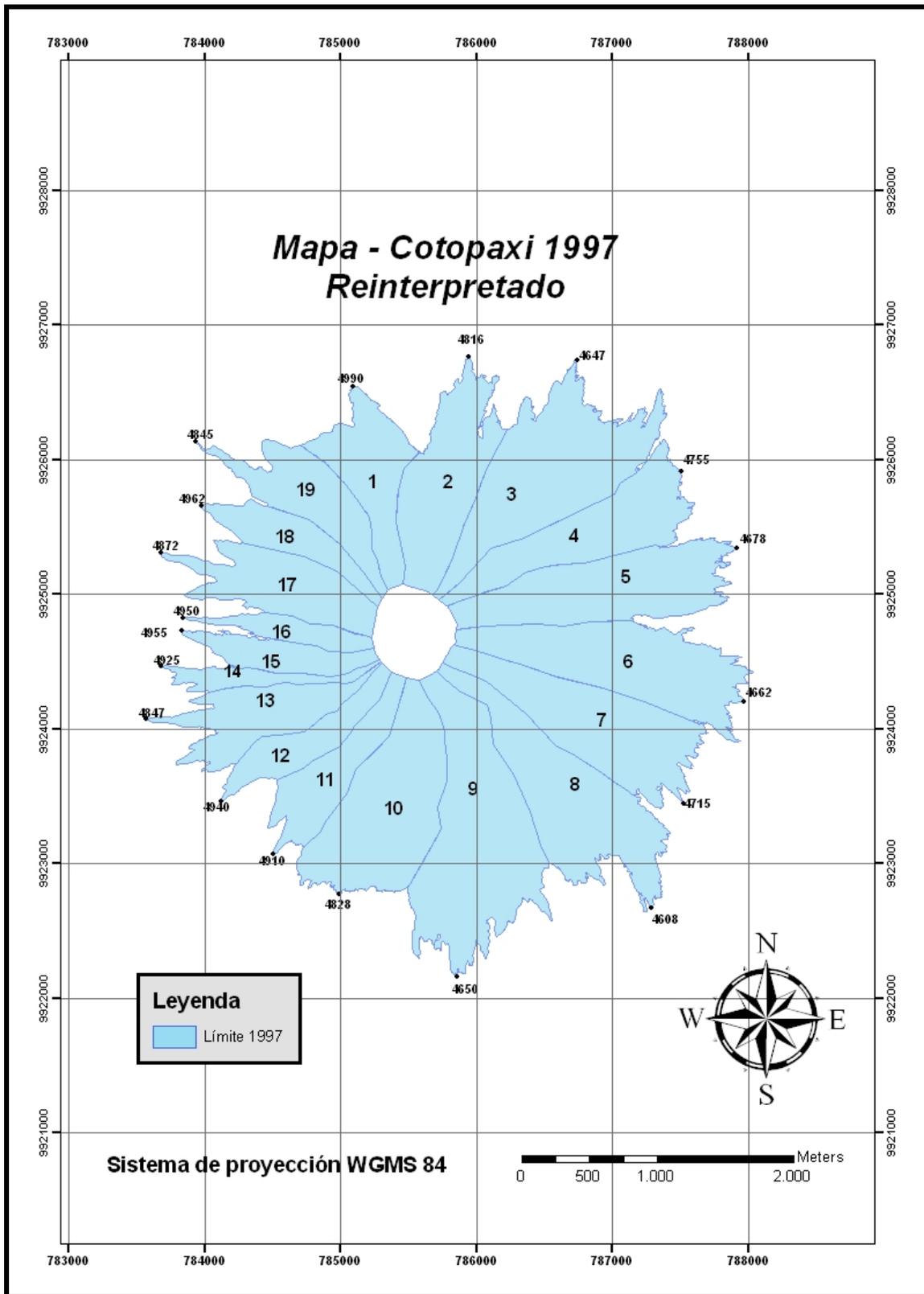
(a)

Longitud máxima (km)	Longitud máxima de ablación (km)	Máxima longitud	Numero de cuencas	Escala de la topografía	Elevación media	Máxima elevación (m.s.n.m.)	Mínima elevación (m.s.n.m.)	Mínima elevación expuesta (m.s.n.m.)
1,5200	0,4420	1,52	1	1:25000	5441	5890	4990	4990
1,7590	0,6360	1,759	1	1:25000	5334	5850	4816	4816
2,0630	0,7640	2,063	1	1:25000	5298	5850	4647	4647
2,0200	0,4900	2,02	1	1:25000	5249	5850	4755	4755
2,1610	0,6140	2,161	1	1:25000	5310	5850	4678	4678
2,1950	0,6380	2,195	1	1:25000	5255	5830	4662	4662
2,0540	0,4670	2,054	1	1:25000	5215	5770	4715	4715
2,4810	0,7050	2,481	1	1:25000	5226	5770	4608	4608
2,3190	0,6150	2,319	1	1:25000	5203	5800	4650	4650
1,7250	0,3550	1,725	1	1:25000	5253	5790	4828	4828
1,6280	0,4490	1,628	1	1:25000	5239	5830	4910	4910
1,6220	0,5000	1,622	1	1:25000	5334	5840	4940	4940
1,8370	0,5610	1,837	1	1:25000	5375	5840	4847	4847
1,6530	0,3730	1,653	1	1:25000	5365	5840	4925	4925
1,4490	0,4950	1,449	1	1:25000	5329	5810	4955	4955
1,4090	0,6320	1,409	1	1:25000	5375	5800	4950	4950
1,6650	0,6740	1,665	1	1:25000	5343	5800	4872	4872
1,5320	0,4660	1,532	1	1:25000	5400	5840	4962	4962
1,886	0,7520	1,886	1	1:25000	5368	5890	4845	4845

(b)

Elevación media de acumulación (m.s.n.m.)	Elevación de la línea de equilibrio (m.s.n.m.)	Elevación media de ablación (m.s.n.m.)	Orientación de la zona de acumulación	Orientación de la zona de ablación	Año de la fotografía	Año de medida de la línea de equilibrio	Periodo de actividad	Año de la topografía
5665	5240	5116	N	N	2006	2006	10	2006
5498	5145	4982	N	N	2006	2006	10	2006
5393	4935	4840	NE	NE	2006	2006	10	2006
5390	4930	4789	NE	NE	2006	2006	10	2006
5390	4930	4850	NE	NE	2006	2006	10	2006
5370	4910	4795	E	E	2006	2006	10	2006
5355	4940	4800	E	E	2006	2006	10	2006
5300	4830	4756	SE	SE	2006	2006	10	2006
5355	4910	4758	SE	SE	2006	2006	10	2006
5420	5050	4883	SE	SE	2006	2006	10	2006
5490	5150	4899	S	S	2006	2006	10	2006
5530	5220	5024	SW	SW	2006	2006	10	2006
5480	5120	5015	SW	SW	2006	2006	10	2006
5475	5110	5000	SW	SW	2006	2006	10	2006
5510	5210	5029	W	W	2006	2006	10	2006
5530	5260	5105	W	W	2006	2006	10	2006
5520	5240	5063	W	W	2006	2006	10	2006
5525	5210	5085	NW	NW	2006	2006	10	2006
5560	5230	5038	NW	NW	2006	2006	10	2006

(c)



*Figura 6.2. Cobertura areal para el Casquete del Cotopaxi año 2006
Modificado de Jordan 2007; Jordan et al., 2005; Cáceres, 2005*

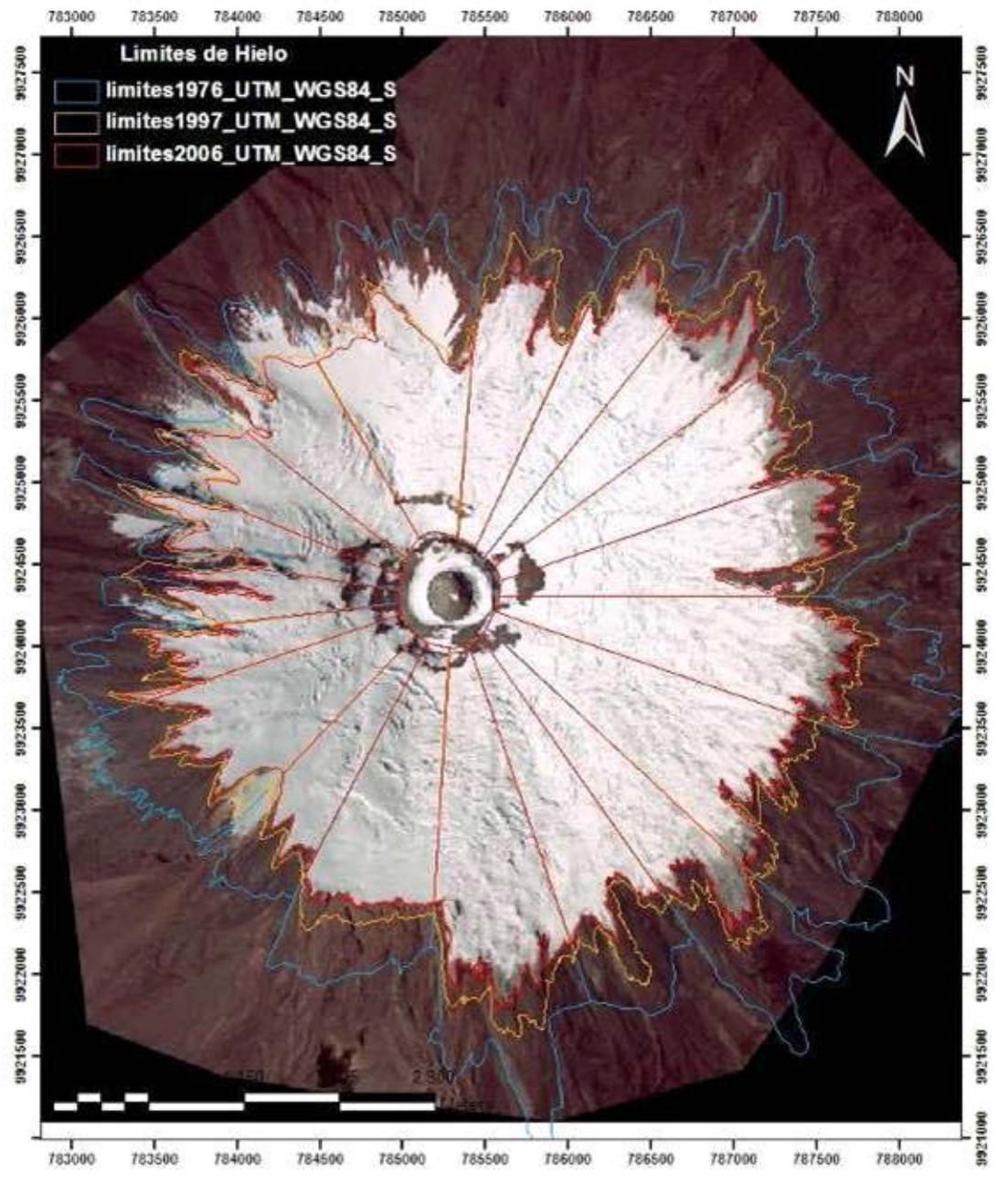


Figura 6.3. Ortofotografía para el casquete glaciar del Cotopaxi, año 2006
 Jordan, 2007; Jordan et al., 2005; Cáceres et al., 2008; Cáceres 2005

6.1.2 Inventarios anteriores fotos 1976-1997

Empleando el mismo procedimiento descrito para la fotografía del año 1976 y 1997 se generó un modelo digital de terreno con curvas de nivel cada 5 metros utilizando una interpolación-TIN. De este trabajo se derivó una ortofoto en color para el año de 1997, Sobre ésta se realizó una reinterpretación, se midieron los valores representativos de altura para cada una de las lenguas glaciares y los límites de su contorno, lo cual permitió realizar el posterior estudio y análisis de sus características principales (áreas,

y longitudes.). (Cáceres, 2003; Cáceres, 2005; Cáceres, 2008; Jordan, 1983; Jordan et al., 2005).

Los resultados obtenidos se presentan sobre, las *Tabla 6.2* y *Tabla 6.3*, las *Figura 6.4*, *Figura 6.5*, *Figura 6.6* y *Figura 6.7*. Se puede observar que tomando como punto de partida el trabajo realizado por Jordan (1983) con fotografías del año 1976 y comparándolo con el trabajo de Cáceres (2003) se tiene un porcentaje de reducción del área con un valor promedio del 31% para cada una de las lenguas glaciares y un porcentaje de pérdida de longitud como promedio del 18% para cada una de las lenguas glaciares.

Nombre	Area (1976) m ²	Area medida (1997) m ²	% Reducción de area	Longitud (1976) m	Longitud (1997) m	% Reducción de longitud	Volumen (1976) m ³	Volumen (1997) m ³
Glaciar Sindipampa	1437000	865288,0	39,8	2228	1801,7	19,1	71850000	43264400
Glaciar Carero Machay	975100	770736,7	21,0	2463	2241,1	9,0	48755000	38536833
Glaciar Potrerillos	982800	772697,4	21,4	2665	2415,3	9,4	49140000	38634871
Glaciar Pucahuaycu Norte	1203800	889489,8	26,1	3014	2690,9	10,7	60190000	44474491
Glaciar Mudadero	1170900	725944,4	38,0	2859	2384,9	16,6	58545000	36297219
Glaciar Cajas	1362500	934392,4	31,4	3195	2502,3	21,7	68125000	46719618
Glaciar Tamboyacu	1535300	1260519,4	17,9	3235	2590,0	20,2	76765000	63025969
Glaciar Manantial	2009100	981946,5	51,1	3117	2471,0	20,7	100455000	49097327
Glaciar Tambo	1165200	893101,4	23,4	3530	2795,4	20,8	58260000	44655070
Glaciar Churruhurco	1348900	994822,7	26,2	2810	2723,6	3,1	67445000	49741136
Glaciar Simarrones	1585600	1268440,9	20,0	3463	2585,0	25,4	79280000	63422046
Glaciar El Picacho	1403500	1067240,8	24,0	2511	2063,4	17,8	70175000	53362038
Glaciar Saquimala	768800	353646,2	54,0	2160	1783,3	17,4	38440000	17682308
Glaciar San Lorenzo	1192300	740290,9	37,9	2342	1932,7	17,5	59615000	37014547
Glaciar Capuli-Huaicu	776100	435090,2	43,9	2339	1861,9	20,4	38805000	21754511
Glaciar Pucahuacu Oeste	298300	195418,4	34,5	1353	777,5	42,5	14915000	9770921
Glaciar Chanchunga Sur	382600	320682,1	16,2	2378	1917,9	19,3	19130000	16034107
Glaciar Chanchunga Norte	712300	427634,5	40,0	2438	1859,5	23,7	35615000	21381727
Glaciar Yanasacha	957400	735124,3	23,2	2416	2128,7	11,9	47870000	36756217
Sumatoria	21267500	14632507,1	-----	-----	-----	-----	1063375000	731625357
Promedio	-----	-----	31,0	2658,7	2185,1	18,3	-----	-----

Tabla 6.2. Áreas y Longitudes medidas para cada una de las lenguas del Glaciar del Cotopaxi entre 1976 y 1997. Cáceres 2003; Cáceres 2005; modificado Jordan 1983

Año	Area (m ²)	Volumen (m ³)	Area (km ²)	Volumen (km ³)
1976	21267500	1063375000	21,3	1,06
1997**	14632507	731625357	14,6	0,73

** Para la estimación del volumen se considero un espesor promedio de 50 metros.

Tabla 6.3. Área medida y volumen estimado para el casquete glaciar del Cotopaxi entre 1976 y 1997. Cáceres 2005

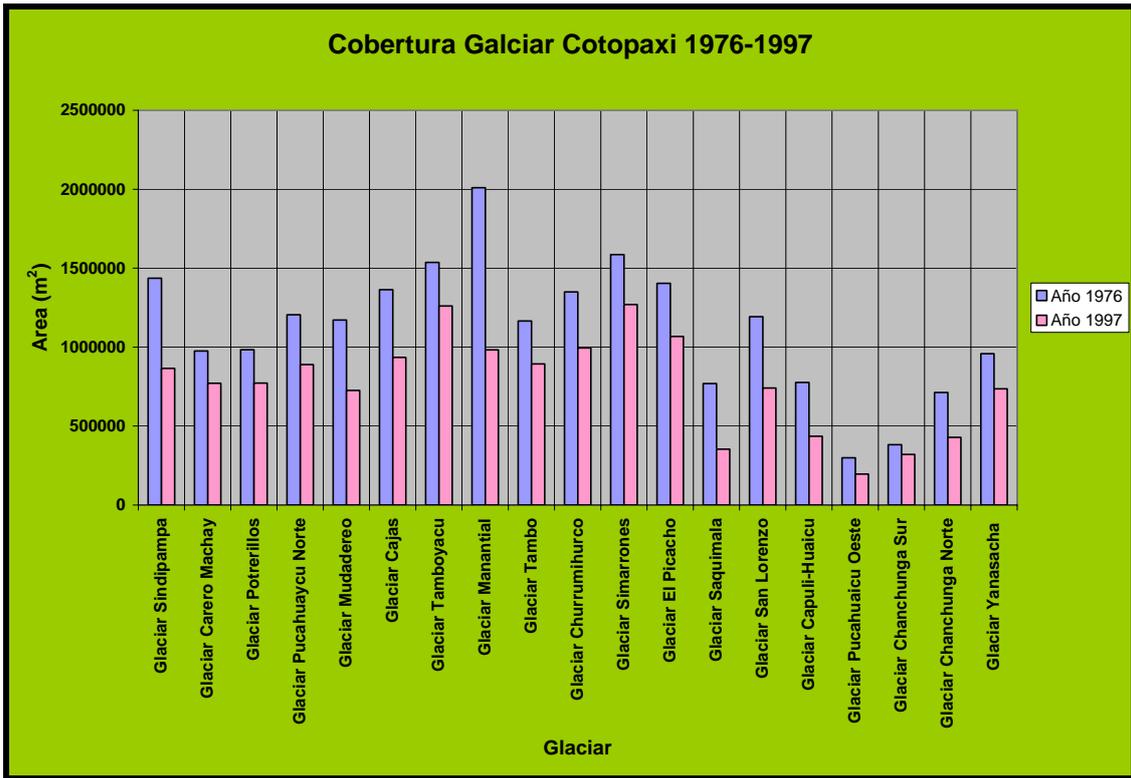


Figura 6.4. Comparación de las áreas glaciares del Cotopaxi entre 1976 y 1997

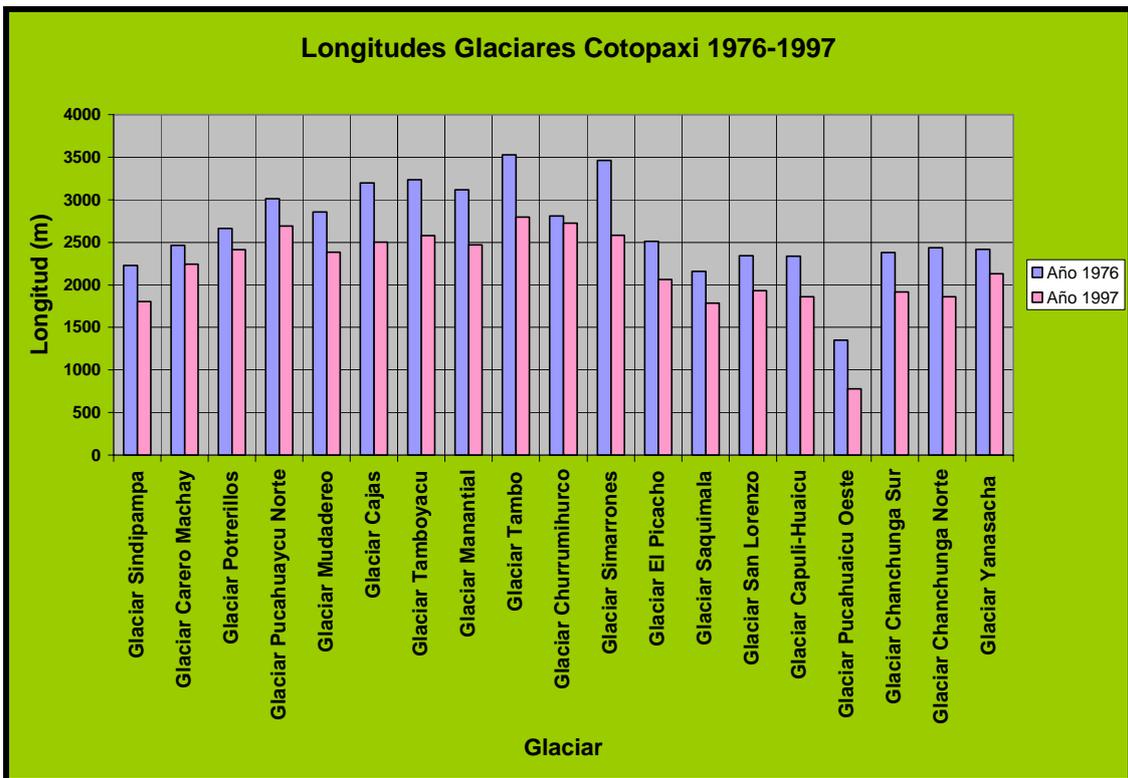


Figura 6.5. Comparación de las longitudes glaciares del Cotopaxi entre 1976 y 1997

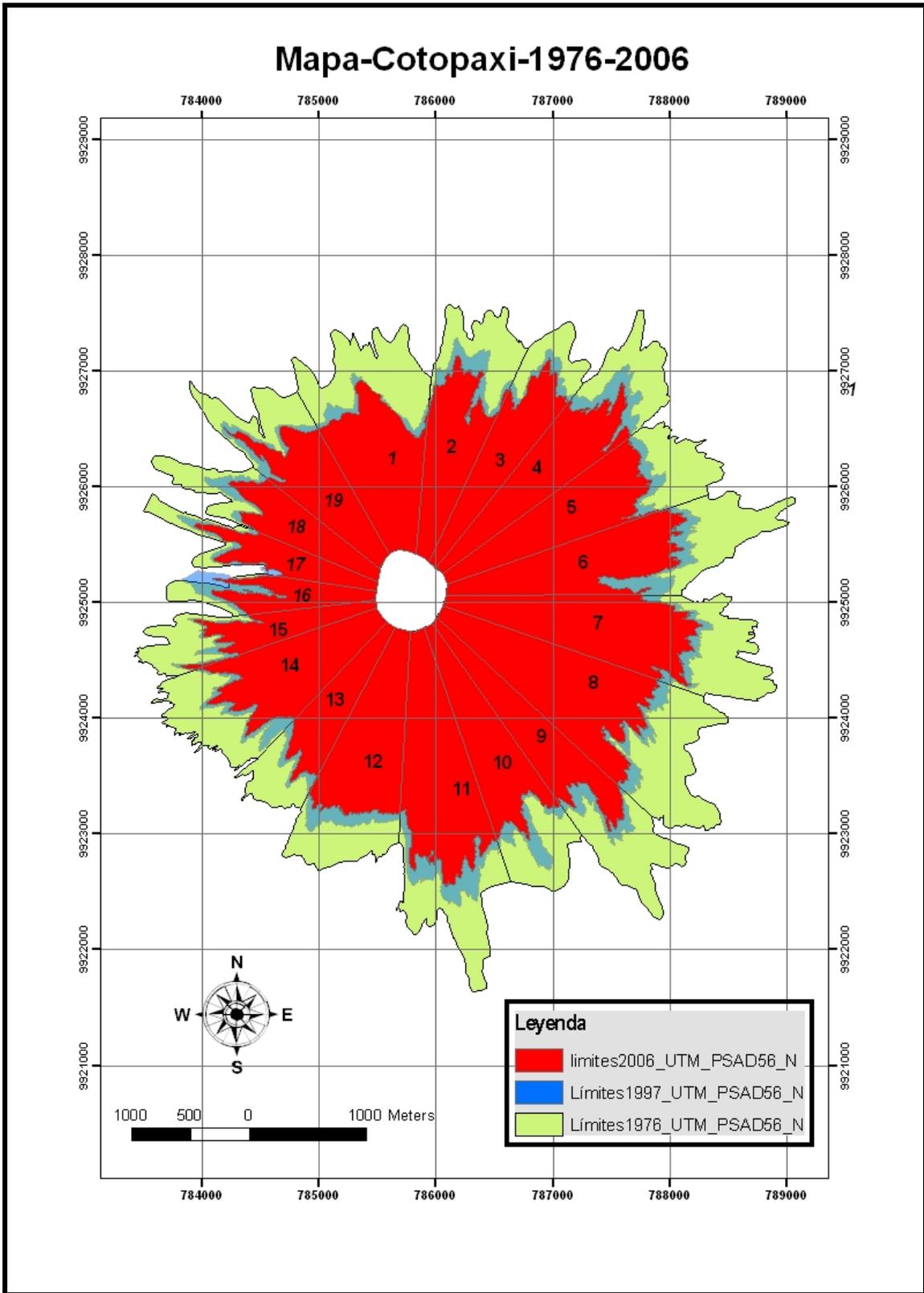
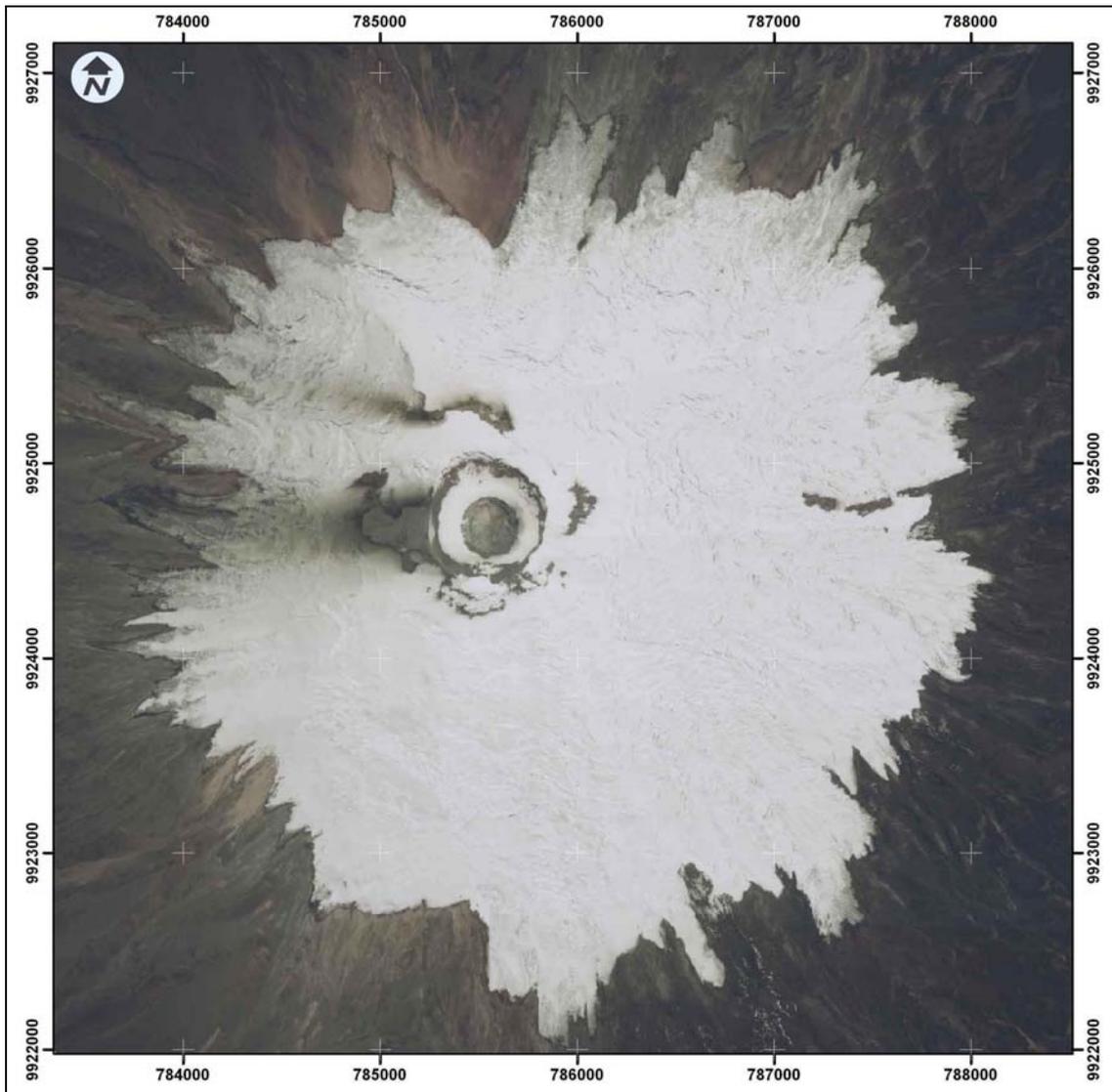


Figura 6.6. Comparación de las coberturas glaciares 1976-2006 para el volcán Cotopaxi. Cáceres, 2005; Jordan et. al., 2005, Cadier et al., 200; Cáceres et al., 2008;



*Figura 6.7. Ortofotografía para el volcán Cotopaxi para el año 1997
Jordan et. al., 2005*

Para el caso del Cotopaxi se evaluó una pérdida del 28.8% para el período 1976-1997, para el período 1997-2006 se tuvo una pérdida del 22.5% de cobertura observándose que la pérdida se aceleró a casi el doble si se comparan los dos períodos analizados. La reducción para el período 1976-2006 corresponde al 42%.

Para los glaciares de la parte oeste del casquete se evaluó una pérdida del 22%, mientras que para la parte este la pérdida fue del 19.7%. La relación descrita se la puede observar sobre la *Tabla 6.4* y la *Figura 6.8*.

Nombre	Area (1976) (m ²)	Area (1997) (m ²)	% Reducción 1976-1997	Area (2006) (m ²)	% Reducción 1997-2006
Glaciar Sindipampa	1437000	865288	39,8	751789	13,1
Glaciar Carero Machay	975100	770737	21,0	580208	24,7
Glaciar Potrerillos	982800	772697	21,4	531162	31,3
Glaciar Pucahuaycu Norte	1203800	889490	26,1	674696	24,1
Glaciar Mudadero	1170900	725944	38,0	721445	0,6
Glaciar Cajas	1362500	934392	31,4	765086	18,1
Glaciar Tamboyacu	1535300	1260519	17,9	912293	27,6
Glaciar Manantial	2009100	1181947	41,2	1027097	13,1
Glaciar Tambo	1165200	893101	23,4	581174	34,9
Glaciar Churruhurco	1348900	994823	26,2	634187	36,3
Glaciar Simarrones	1585600	1268441	20,0	986697	22,2
Glaciar El Picacho	1403500	1067241	24,0	775671	27,3
Glaciar Saquimala	1177174	800658	32,0	393018	50,9
Glaciar San Lorenzo	1192300	740291	37,9	722610	2,4
Glaciar Capuli-Huacu	776100	435090	43,9	286156	34,2
Glaciar Pucahuacu Oeste	426872	350014	18,0	271175	22,5
Glaciar Chanchunga Sur	382600	320682	16,2	303737	5,3
Glaciar Chanchunga Norte	712300	427635	40,0	372242	13,0
Glaciar Yanasacha	957400	735124	23,2	545311	25,8
Sumatoria	21267500	14632507	-----	11835754	-----
Promedio	-----	-----	28,5	-----	22,5

Tabla 6.4. Áreas para el Casquete glaciar del Cotopaxi períodos 1976-1997/1997-2006

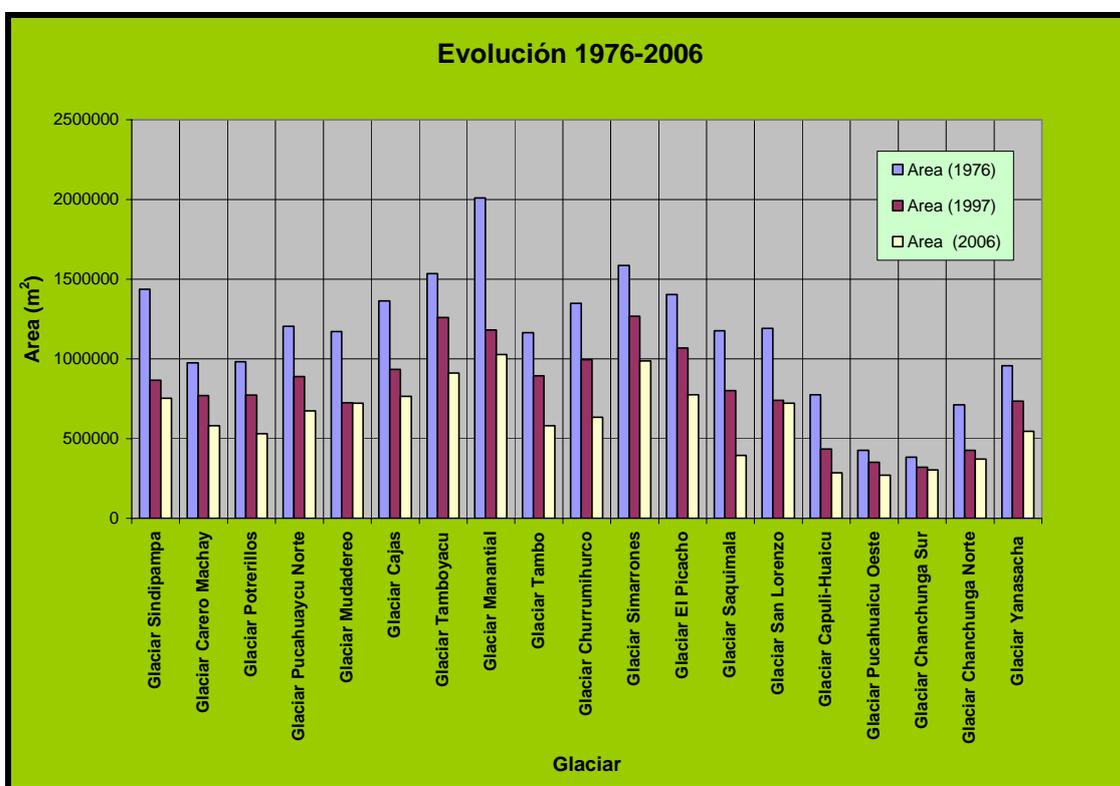


Figura 6.8. Evolución de los glaciares del Cotopaxi, períodos 1976-1997/1997-2006

6.2 Volcán Chimborazo

6.2.1 Inventario actualizado foto 1997

Como base se utilizaron los puntos de control medidos durante los años 2002-2003 y la aerotriangulación correspondiente a la fotografía de 1997. (Cáceres, 2003; Jordan et al., 2008).

Utilizando la metodología descrita se realizó la evaluación del casquete glaciar del Chimborazo siguiendo las recomendaciones del Servicio de Monitoreo mundial de Glaciares (WGMS), se evaluaron para cada glaciar treinta y cinco parámetros (35), obteniéndose los resultados que se detallan a continuación., sobre la *Tabla 6.5* de parámetros del casquete glaciar del Chimborazo (a, b, c, d) y la *Figura 6.9*.

Se obtuvo una cobertura glaciar de 11.81 km² repartidos sobre las 22 lenguas existentes, ver *Figura 6.10*. Se generó una ortofotografía de alta resolución, ver *Figura 6.11*. (*Jordan et al., in press*) a partir de la cual se realizó la interpretación.

Se generó la topografía correspondiente a escala 1:20000 y se realizó la correspondiente evaluación de cada uno de los parámetros. (*Cáceres, 2008; Cáceres et. al., 2006*)

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Latitud	Longitud	Area total (km ²)	Area en el sitio (km ²)	Area expuesta	Longitud media (km)	Profundidad media (m)
EC1Q00011001	REISS	-1.43830	-78.811700	0,8169	0,8169	0,8169	1,8712	----
EC1Q00011002	SPRUCE	-1.44000	-78.801700	0,5557	0,5557	0,5557	2,6011	----
EC1Q00011003	ABRASPUNGO	-1.44170	-78.795000	2,6508	2,6508	2,6508	3,7368	----
EC1Q00011004	HANS MEYER	-1.45000	-78.790000	2,1116	2,1116	2,1116	3,8377	----
EC1Q00011005	RESCHREITER	-1.45830	-78.790000	0,6428	0,6428	0,6428	2,3183	----
EC1Q00011006	CARLOS ZAMBRANO	-1.46170	-78.788300	0,6836	0,6836	0,6836	1,8006	----
EC1Q00011007	THEODORO WOLF	-1.47000	-78.786700	0,1206	0,1206	0,1206	0,8521	----
EC1Q00011008	GARCIA MORENO	-1.47330	-78.786700	0,0618	0,0618	0,0618	0,7749	----
EC1Q00011009	CHUQUIPOQUIO (S/N)	-1.47670	-78.788300	0,1648	0,1648	0,1648	1,1375	----
EC1Q00011010	BOUSSIGNAULT	-1.47670	-78.791700	0,0609	0,0609	0,0609	0,6283	----
EC1Q00011011	(S/N)	-1.47670	-78.793300	0,4186	0,4186	0,4186	1,1299	----
EC1Q00011012	NICOLAS MARTINEZ	-1.47670	-78.795000	0,0662	0,0662	0,0662	0,4230	----
EC1Q00011013	(S/N)	-1.47830	-78.798300	0,3715	0,3715	0,3715	0,9957	----
EC1Q00011014	CARLOS PINTO	-1.48170	-78.803300	0,0964	0,0964	0,0964	0,8073	----
EC1Q00011015	(S/N)	-1.48170	-78.810000	0,6546	0,6546	0,6546	1,8502	----
EC1Q00011016	Humboldt	-1.48330	-78.820000	0,0846	0,0846	0,0846	0,8107	----
EC1Q00011017	KLEINER SUED (S/N)	-1.48170	-78.820000	0,2587	0,2587	0,2587	1,5053	----
EC1Q00011018	Walter Sauer	-1.47670	-78.833300	0,4179	0,4179	0,4179	1,4937	----
EC1Q00011019	TOTORILLAS	-1.46830	-78.841700	0,1978	0,1978	0,1978	0,7199	----
EC1Q00011020	ESCOMBROS	-1.46500	-78.845000	0,4200	0,4200	0,4200	1,9411	----
EC1Q00011021	THIELMANN	-1.45830	-78.846700	0,6949	0,6949	0,6949	2,2581	----
EC1Q00011022	STUEBEL	-1.45000	-78.830000	0,2647	0,2647	0,2647	1,2427	----

(a)

Longitud máxima	Longitud máxima de ablación (km)	Máxima longitud	Numero de cuencas	Escala de la topografía	Elevación media (m.s.n.m.)	Máxima elevación	Minima elevación	Minima elevación expuesta (m.s.n.m.)
1,8712	0,547	1,8712	1	1:20000	5705	6275	5135	5135
2,6011	1,0145	2,6011	1	1:20000	5637	6250	5024	5024
3,7368	0,9130	3,7368	1	1:20000	5483	6250	4715	4715
3,8377	1,4980	3,8377	1	1:20000	5410	6250	4570	4570
2,3183	0,8910	2,3183	1	1:20000	5347	5850	4843	4843
1,8006	0,9670	1,8006	1	1:20000	5309	5850	4768	4768
0,8521	0,2770	0,8521	1	1:20000	5435	5850	5020	5020
0,7749	0,1660	0,7749	1	1:20000	5410	5700	5120	5120
1,1375	0,2980	1,1375	1	1:20000	5337	5700	4973	4973
0,6283	0,1830	0,6283	1	1:20000	5438	5700	5175	5175
1,1299	0,5320	1,1299	1	1:20000	5433	5850	5015	5015
0,4230	0,132	0,4230	1	1:20000	5743	5850	5635	5635
0,9957	0,556	0,9957	1	1:20000	5520	5850	5190	5190
0,8073	0,241	0,8073	1	1:20000	5635	5750	5520	5520
1,8502	0,9090	1,8502	1	1:20000	5660	6250	5070	5070
0,8107	0,177	0,8107	1	1:20000	6005	6250	5760	5760
1,5053	0,357	1,5053	1	1:20000	5805	6250	5360	5360
1,4937	0,401	1,4937	1	1:20000	5855	6275	5435	5435
0,7199	0,412	0,7199	1	1:20000	5963	6275	5650	5650
1,9964	0,493	1,9964	1	1:20000	5733	6275	5190	5190
2,3720	0,718	2,3720	1	1:20000	5708	6275	5140	5140
1,2874	0,274	1,2874	1	1:20000	5998	6275	5720	5720

(b)

Elevación media de acumulación	Elevación de la línea de equilibrio	Elevación media de ablación	Orientación de la zona de acumulación	Orientación de la zona de ablación	Año de la fotografía	Año de medida de la línea de equilibrio	Período de actividad	Año de la topografía
5900	5525	5330	N	N	1997	1997	33	1997
5900	5550	5287	N	N	1997	1997	33	1997
5645	5040	4878	NE	NE	1997	1997	33	1997
5630	5010	4790	NE	NE	1997	1997	33	1997
5513	5175	5009	NE	NE	1997	1997	33	1997
5480	5110	4939	NE	NE	1997	1997	33	1997
5518	5185	5103	E	E	1997	1997	33	1997
5488	5275	5198	SE	SE	1997	1997	33	1997
5425	5150	5062	SE	SE	1997	1997	33	1997
5493	5285	5230	S	S	1997	1997	33	1997
5530	5210	5113	S	S	1997	1997	33	1997
5813	5775	5705	S	S	1997	1997	33	1997
5655	5460	5325	S	S	1997	1997	33	1997
5715	5680	5600	S	S	1997	1997	33	1997
5880	5510	5290	S	S	1997	1997	33	1997
6080	5910	5835	S	S	1997	1997	33	1997
5935	5620	5490	SW	SW	1997	1997	33	1997
5998	5720	5578	SW	SW	1997	1997	33	1997
6130	5985	5818	SW	SW	1997	1997	33	1997
5918	5560	5375	W	W	1997	1997	33	1997
5930	5585	5363	W	W	1997	1997	33	1997
6098	5920	5820	NW	NW	1997	1997	33	1997

(c)

Clasificación Primaria	Forma	Características del frente	Longitud del perfil	Fuente de alimentación	Actividad de la lengua	Morrenas -I	Morrenas-II
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	3	1	0	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
4	0	0	3	1	0	-999	1
0	0	0	0	2	0	-999	-9999
4	0	0	3	1	0	-999	1

(d)

Tabla 6.5. Evaluación Chimborazo año 1997

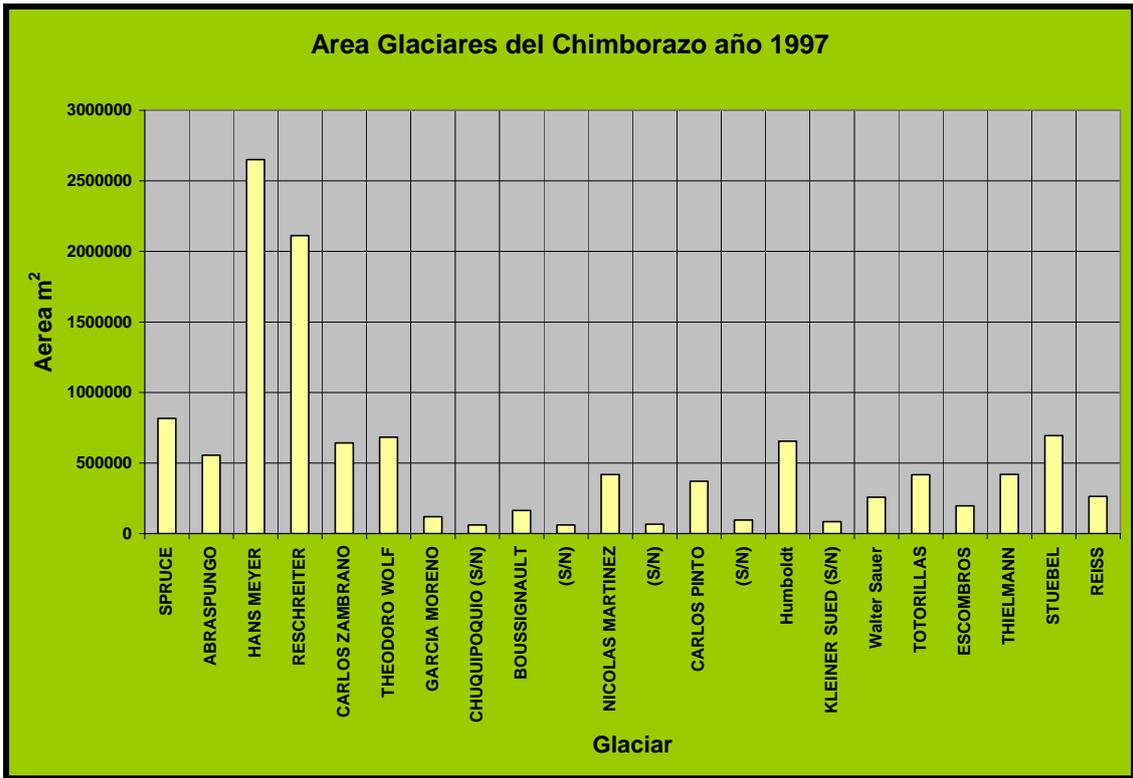


Figura 6.9. Evaluación Chimborazo año 1997

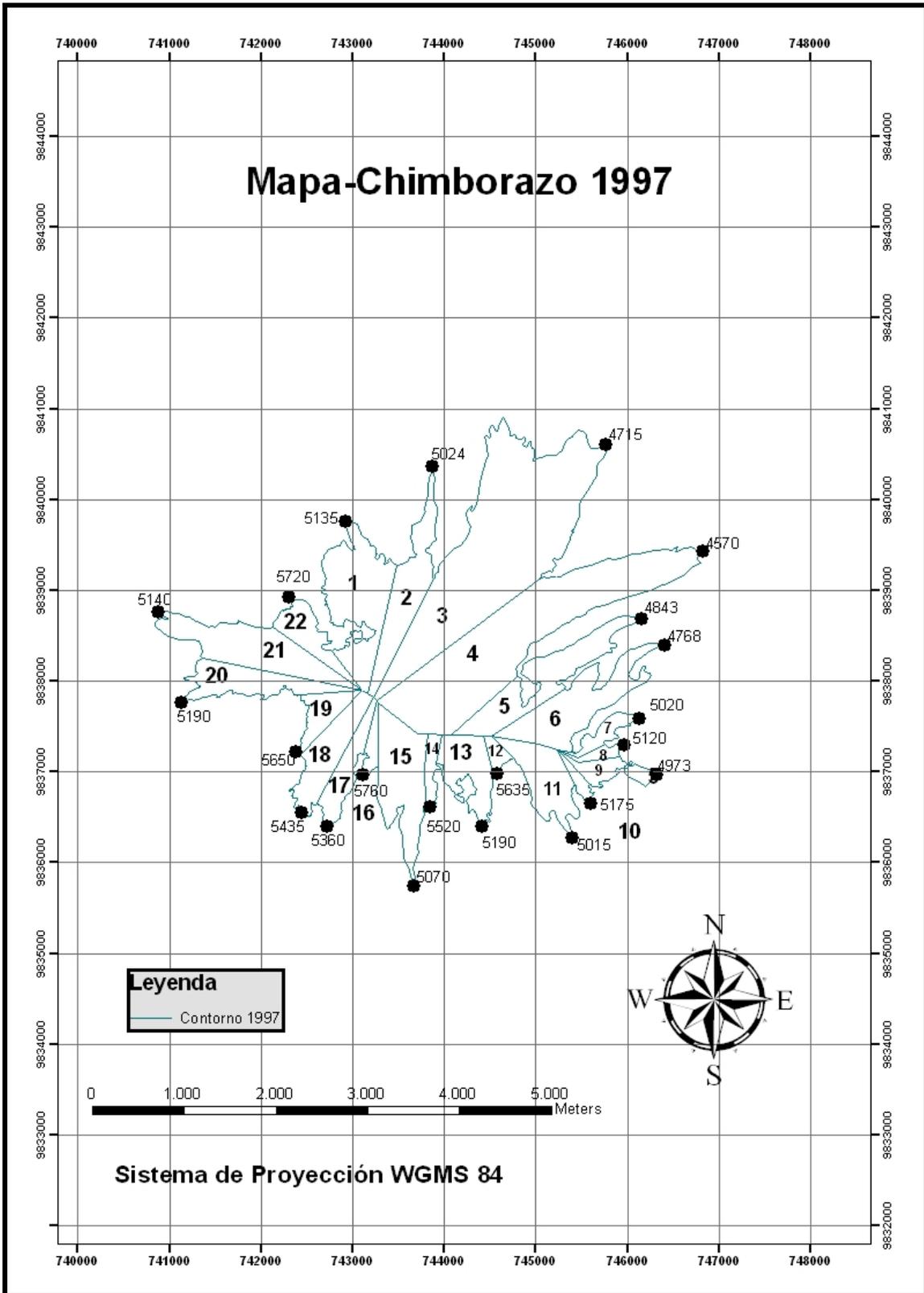


Figura 6.10. Mapa general del Casquete Glaciar del Chimborazo, año 1997
 Interpretado de Jordan et al., 2008

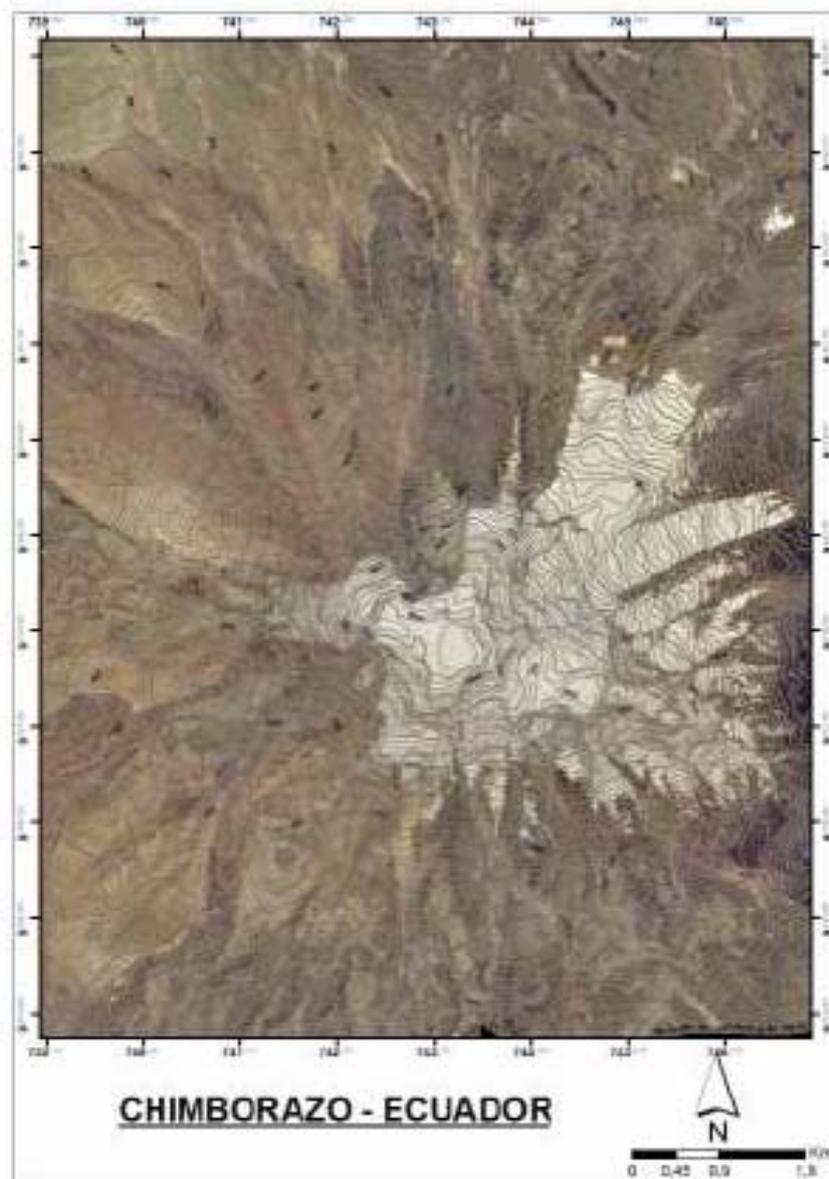


Figura 6.11. Ortofotografía para el volcán Chimborazo para el año 1997
 Jordan et. al 2008

6.2.2 Inventario anterior fotos 1962

Empleando la metodología propuesta por el WGMS se presentan los datos obtenidos para el primer inventario (áreas, y longitudes.) de manera resumida, se midió una cobertura de 27.7 km². (Hastenrath, 1981; Jordan et al., 1999). Los resultados obtenidos se presentan sobre, la Tabla 6.6 y la Figura 6.12.

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Latitud	Longitud	Area total (km ²)	Longitud media (km)	Orientación de la zona de ablación	Máxima elevación	Mínima elevación
EC1Q00011001	SPRUCE	-1.43830	-78.811700	1,6000	2,0000	N	5600	4700
EC1Q00011002	ABRASPUNGO	-1.44000	-78.801700	1,4000	2,0000	N	5600	4700
EC1Q00011003	HANS MEYER	-1.44170	-78.795000	3,7000	2,5000	NE	5600	4600
EC1Q00011004	RESCHREITER	-1.45000	-78.790000	2,6000	2,3000	NE	5600	4600
EC1Q00011005	CARLOS ZAMBRANO	-1.45830	-78.790000	0,8000	0,4000	NE	5600	4800
EC1Q00011006	THEODORO WOLF	-1.46170	-78.788300	1,2000	2,0000	NE	5600	4800
EC1Q00011007	GARCIA MORENO	-1.47000	-78.786700	1,2000	2,0000	E	5600	4750
EC1Q00011008	CHUQUIPOQUIO	-1.47330	-78.786700	0,8000	0,4000	SE	5600	4800
EC1Q00011009	BOUSSIGNAULT	-1.47670	-78.788300	1,2000	2,0000	SE	5600	4800
EC1Q00011010	NICOLAS MARTINEZ	-1.47670	-78.791700	0,3000	1,0000	S	5400	4800
EC1Q00011011	S/n	-1.47670	-78.793300	0,6000	1,0000	S	5400	4800
EC1Q00011012	CARLOS PINTO	-1.47670	-78.795000	0,3000	1,0000	S	5400	4800
EC1Q00011013	SUEDOST	-1.47830	-78.798300	0,8000	2,0000	S	5600	4900
EC1Q00011014	SUEDSUEDOST	-1.48170	-78.803300	0,8000	2,0000	S	5600	4950
EC1Q00011015	KLEINER SUED	-1.48170	-78.810000	0,8000	2,0000	S	5600	4800
EC1Q00011016	GROSSER SUED	-1.48330	-78.820000	0,8000	2,0000	S	5600	4800
EC1Q00011017	TOTORILLAS	-1.48170	-78.820000	1,0000	2,0000	SW	5600	4800
EC1Q00011018	ESCOMBROS	-1.47670	-78.833300	0,7000	2,0000	SW	5600	4800
EC1Q00011019	THIELMANN	-1.46830	-78.841700	1,3000	2,3000	SW	5600	4800
EC1Q00011020	STUEBEL	-1.46500	-78.845000	1,4000	2,4000	W	5600	4750
EC1Q00011021	LEA HEARN	-1.45830	-78.846700	1,0000	1,0000	W	5000	4800
EC1Q00011022	REISS	-1.45000	-78.830000	3,4000	2,4000	NW	5600	4900

Tabla 6.6. Evaluación del casquete Glaciar del Chimborazo año 1962
Modificado de Hastenrath 1981; Jordan et al. 1999

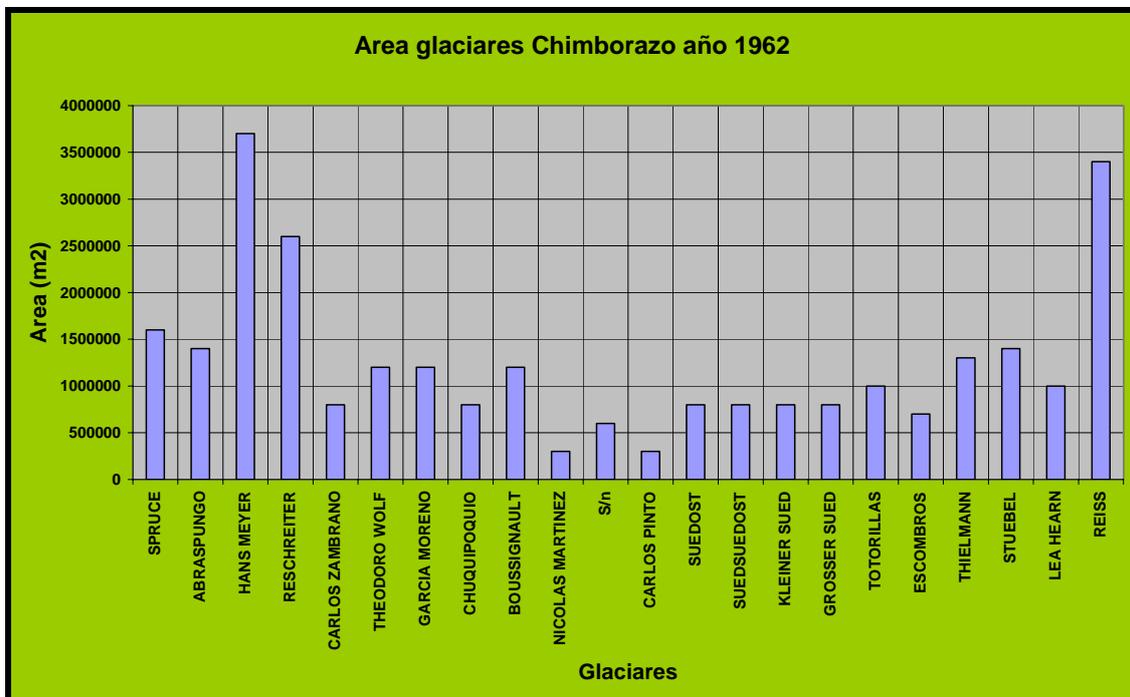


Figura 6.12. Áreas para los glaciares del Chimborazo
Modificado de Hastenrath 1981; Jordan et al. 1999

Para el caso del Chimborazo se evaluó un área de 11.82 km² con una pérdida del 59.8% para el período 1962-1997.

Para los glaciares de la parte oeste del casquete se evaluó una pérdida del 64.9%, mientras que para la parte este la pérdida fue del 57.6%. La relación descrita se la puede observar sobre la **Tabla 6.7** y figura 6.13

Glaciar	Area (1962) (m ²)	Area (1997) (m ²)	% Reducción 1962-1997
1	1600000	816873	48,9
2	1400000	555744	60,3
3	3700000	2650808	28,4
4	2600000	2111599	18,8
5	800000	642838	19,6
6	1200000	683632	43,0
7	1200000	120573	90,0
8	800000	61764	92,3
9	1200000	164766	86,3
10	300000	60931	79,7
11	600000	418628	30,2
12	300000	66189	77,9
13	800000	371451	53,6
14	800000	96435	87,9
15	800000	654578	18,2
16	800000	84638	89,4
17	1000000	258731	74,1
18	700000	417943	40,3
19	1300000	197766	84,8
20	1400000	420035	70,0
21	1000000	694882	30,5
22	3400000	264651	92,2
Suma/promedio	27700000	11815455	59,8

Tabla 6.7. Áreas para el Casquete glaciar del Chimborazo período 1962-1997

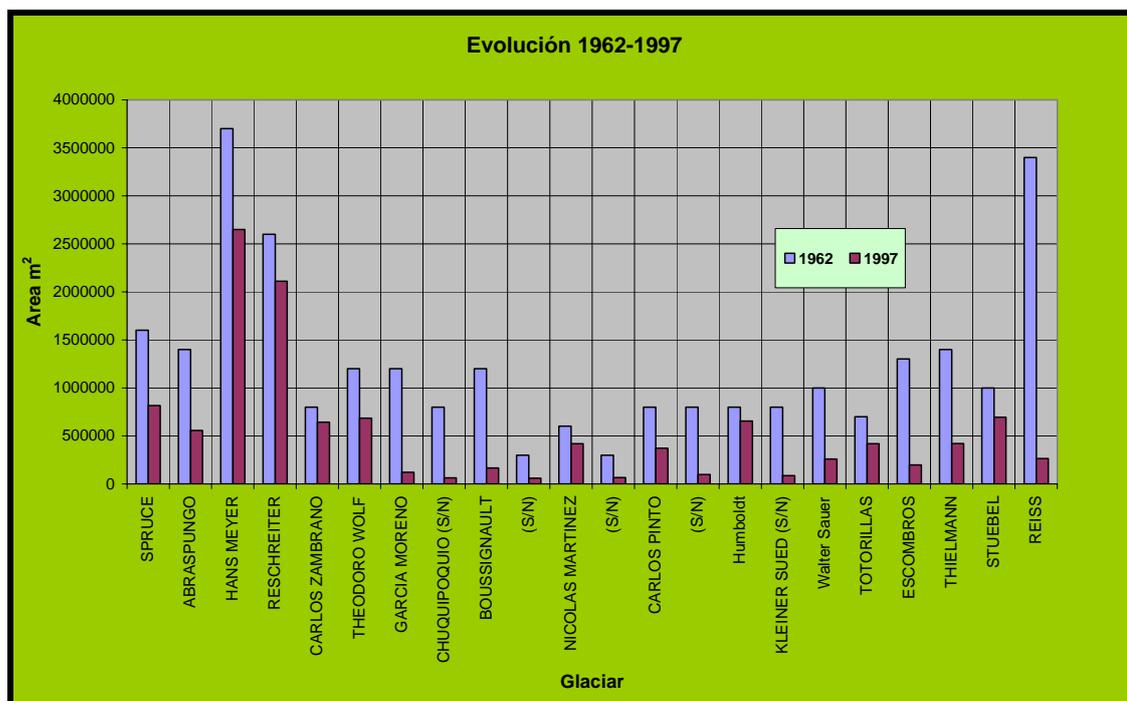


Figura 6.13. Evolución de los glaciares del Chimborazo, período 1962-1997

6.2.3 Inventario proyectado al año 2006

En base a los trabajos de fotogrametría que se realizaron sobre el volcán Cotopaxi para el último período 1997-2006 se estableció que el porcentaje promedio de reducción del casquete glaciar es del 20.2%, para el período 1997-2006 si consideramos que las condiciones meteorológicas son bastante similares en la zona de estudio y aplicamos este valor de reducción al casquete del Chimborazo, obtenemos una proyección bastante aproximada sobre la cobertura glaciar para el año 2006, obteniéndose una cobertura de 9.43 km², los resultados se los puede observar sobre la *Tabla 6.8*.

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Area proyectada 2006 (20,17%) (m2)
EC1Q00011001	REISS	652137,43
EC1Q00011002	SPRUCE	443669,32
EC1Q00011003	ABRASPUNGO	2116229,09
EC1Q00011004	HANS MEYER	1685760,36
EC1Q00011005	RESCHREITER	513199,10
EC1Q00011006	CARLOS ZAMBRANO	545766,00
EC1Q00011007	THEODORO WOLF	96257,29
EC1Q00011008	GARCIA MORENO	49308,51
EC1Q00011009	CHUQUIPOQUIO (S/N)	131537,92
EC1Q00011010	BOUSSIGNAULT	48643,41
EC1Q00011011	(S/N)	334204,86
EC1Q00011012	NICOLAS MARTINEZ	52840,84
EC1Q00011013	(S/N)	296541,45
EC1Q00011014	CARLOS PINTO	76987,48
EC1Q00011015	(S/N)	522571,42
EC1Q00011016	Humboldt	67569,17
EC1Q00011017	KLEINER SUEDE (S/N)	206553,93
EC1Q00011018	Walter Sauer	333657,56
EC1Q00011019	TOTORILLAS	157882,84
EC1Q00011020	ESCOMBROS	335327,80
EC1Q00011021	THIELMANN	554747,61
EC1Q00011022	STUEBEL	211279,80

Tabla 6.8. Proyección de la cobertura glaciar para el año 2006

6.3 Antisana

6.3.1 Inventario actualizado foto 1997

Como base se utilizaron los puntos de control medidos durante los años 1999- 2002-2003 y la aerotriangulación correspondiente a la fotografía de 1997. (Cáceres, 2000; Cáceres, 2003).

Utilizando la metodología descrita se realizó la evaluación del casquete glaciar del Antisana siguiendo las recomendaciones del Servicio de Monitoreo mundial de Glaciares (WGMS), se evaluaron para cada glaciar treinta y cinco parámetros (35), obteniéndose los resultados que se detallan a continuación., sobre la Tabla 6.9 de parámetros del casquete glaciar del Antisana (a, b, c, d) y la Figura 6.14..

Se obtuvo una cobertura glaciar de 15.32 km² repartidos sobre las 17 lenguas existentes, ver Figura 6.15. Para el caso del Antisana no se llegó a la fase de generación de un ortofotografía perfecta.

Se utilizó la topografía correspondiente a escala 1:25000 para el año de 1993 y se realizó la correspondiente evaluación de cada uno de los parámetros. Para el caso de la línea de equilibrio se asume que esta corresponde al valor que se lo mide sobre el glaciar 15 del Antisana para el año considerado. (Cáceres, 2007)

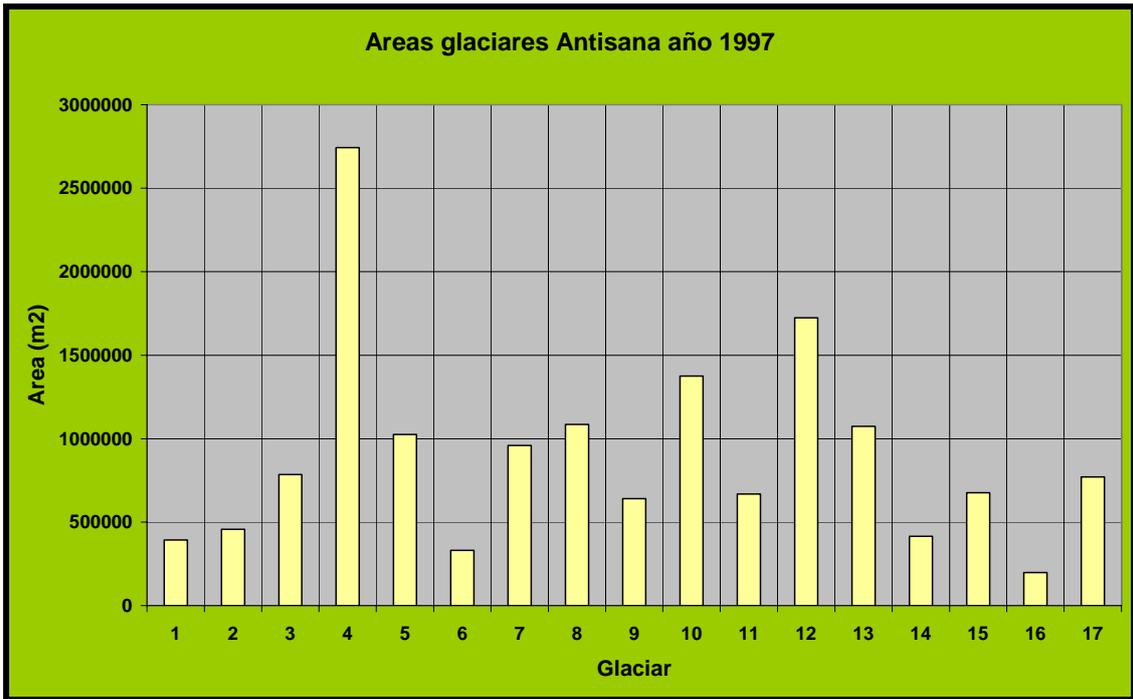


Figura 6.14. Áreas para los glaciares del Antisana para el año 1997

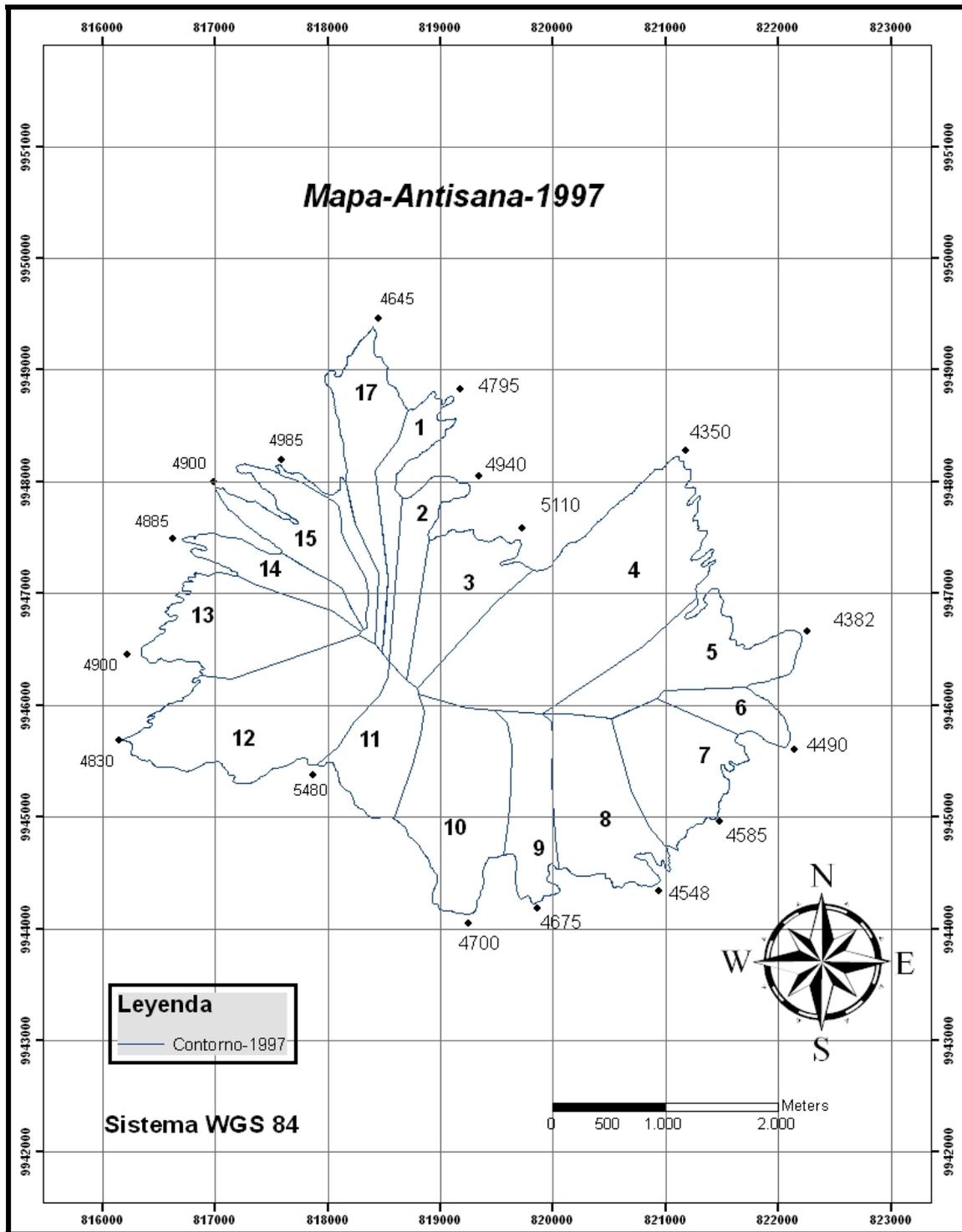


Figura 6.15. Mapa general del Casquete Glaciar del Antisana, año 1997

6.3.2 Inventario anterior fotos 1956

Empleando la metodología propuesta por el WGMS se presentan los datos obtenidos para el primer inventario (áreas, y longitudes.) de manera resumida, se midió una cobertura de 30.8 km². (Hastenrath, 1981; Jordan et al., 1999). Los resultados obtenidos se presentan sobre, la Tabla 6.10 y la Figura 6.16.

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Latitud	Longitud	Area total (km ²)	Longitud media (km)	Orientación de la zona de ablación	Máxima elevación	Mínima elevación
EC1D3037001	---	-0.468300	-78.126700	2,0000	2,0000	NE	5400	4450
EC1D3037002	---	-0.471700	-78.116700	2,2000	2,7000	NE	5400	4200
EC1D3037003	---	-0.475000	-78.113300	1,0000	2,0000	NE	5400	4400
EC1D3037004	---	-0.486700	-78.108300	3,1622	2,4000	E	5400	4400
EC1D3037005	---	-0.493300	-78.110000	1,6000	2,4000	SE	5400	4400
EC1D3037006	---	-0.501700	-78.120000	1,6000	2,4000	S	5400	4350
EC1D3037007	---	-0.503300	-78.125000	1,6000	2,4000	S	5400	4500
EC1D3037008	---	-0.503300	-78.133300	1,6000	2,4000	S	5400	4500
EC1D3037009	---	-0.501700	-78.141700	1,6000	2,4000	S	5400	4700
EC1D3037010	---	-0.500000	-78.146700	1,6000	2,4000	SW	5400	4700
EC1D3037011	---	-0.496700	-78.150000	1,6000	2,4000	SW	5400	4800
EC1D3037012	GREAT WEST	-0.491700	-78.156700	2,0000	2,5000	W	5400	4800
EC1D3037013	---	-0.483300	-78.155000	2,0000	2,5000	W	5400	4850
EC1D3037014	GUAGRAIALINA (Crespos)	-0.476700	-78.153300	1,8000	2,4000	W	5400	4850
EC1D3037015	---	-0.470000	-78.150000	2,0000	2,5000	W	5400	4850
EC1D3037016	---	-0.463300	-78.141700	1,7000	2,2000	N	5400	4550
EC1D3037017	---	-0.463300	-78.135000	1,7000	2,2000	N	5400	4550

Tabla 6.10. Evaluación del casquete Glaciar del Antisana año 1956
Modificado de Hastenrath 1981; Jordan et al. 1999

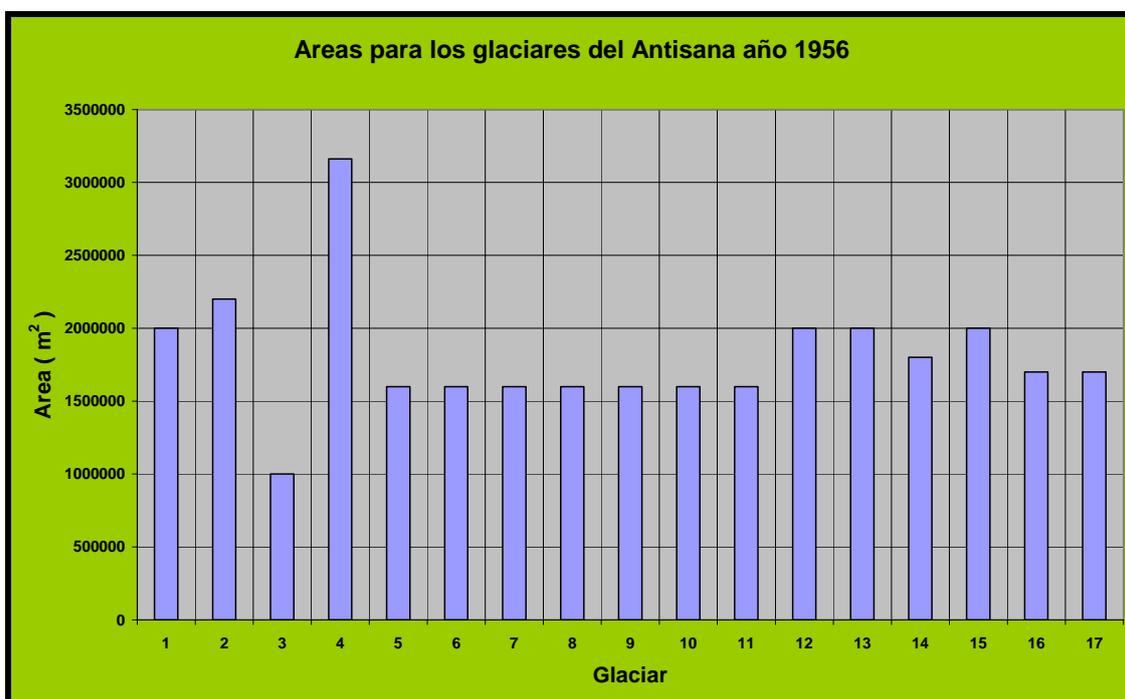


Figura 6.16. Áreas para los glaciares del Antisana
Modificado de Hastenrath, 1981; Jordan et al., 1999

Para el caso de la cobertura glaciara del volcán Antisana se pudo obtener un valor de área de 15.32 km², con un porcentaje de reducción promedio del 50.6% con respecto a la primera evaluación que corresponde al año 1956.

Para los glaciares de la parte oeste se obtuvo un porcentaje de reducción del 50.8%, para la cara este se obtuvo un porcentaje de reducción promedio del 40.1%, evidenciándose de esta manera que el retroceso es más evidente sobre la cara oeste del macizo. La relación se la puede observar sobre la *Tabla 6.11* y la *Figura 6.17*.

Glaciar	Area (1956) (m ²)	Area medida (1997) (m ²)	% Reducción 1956-1997
1	2000000	393732	80,3
2	2200000	456961	79,2
3	1000000	785142	21,5
4	3162215	2742945	13,3
5	1600000	1025590	35,9
6	1600000	331043	79,3
7	1600000	959257	40,0
8	1600000	1085333	32,2
9	1600000	640764	60,0
10	1600000	1375326	14,0
11	1600000	668357	58,2
12	2000000	1724532	13,8
13	2000000	1072970	46,4
14	1800000	414331	77,0
15	2000000	676027	66,2
16	1700000	197959	88,4
17	1700000	770303	54,7
Suma/Promedio	30762215,16	15320572	50,6

Tabla 6.11. Áreas para el Casquete glaciar del Antisana período 1956-1997

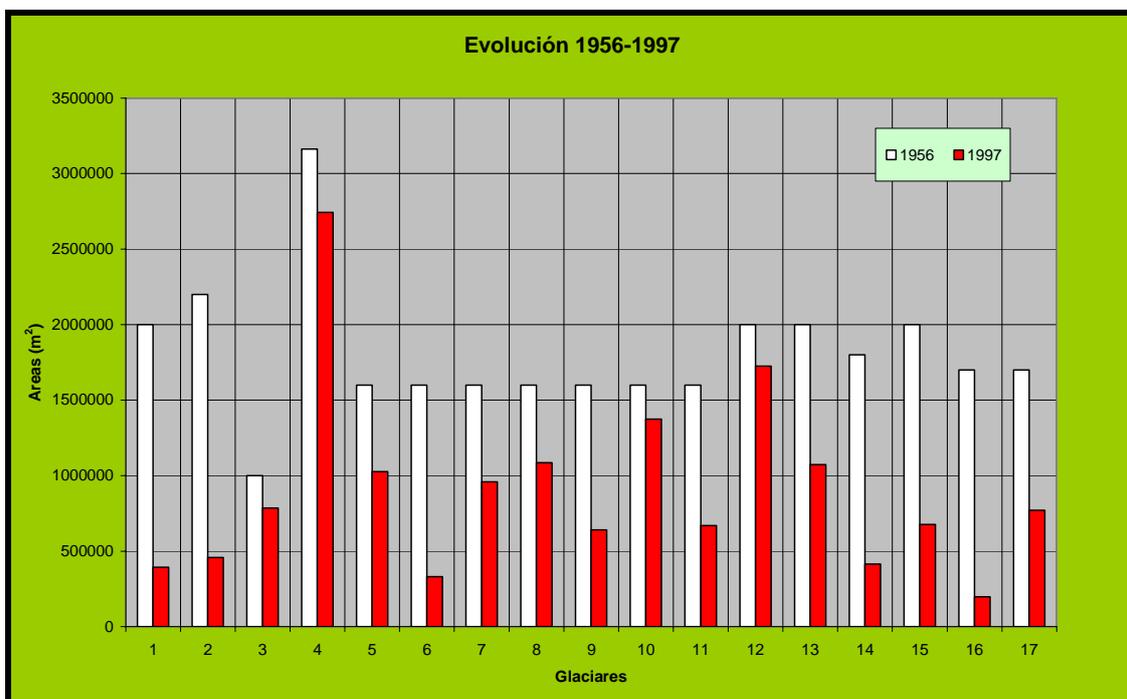


Figura 6.17. Evolución de los glaciares del Antisana, período 1956-1997

6.3.3 Inventario proyectado al año 2006

En base a los trabajos de fotogrametría que se realizaron sobre el volcán Cotopaxi para el último período 1997-2006 se estableció que el porcentaje promedio de reducción del casquete glaciar es del 22.5%, para el período 1997-2006 si consideramos que las condiciones meteorológicas son bastante similares en la zona de estudio y aplicamos este valor de reducción al casquete del Antisana, obtenemos una proyección bastante aproximada sobre la cobertura glaciar para el año 2006, obteniéndose una cobertura de 11.9 km², los resultados se los puede observar sobre la *Tabla 6.12*.

Código WGMS	Nombre del Glaciar	Area proyectada 2006 (20,17%)
EC1D3037001	----	314329,44
EC1D3037002	----	364807,27
EC1D3037003	----	626805,15
EC1D3037004	----	2189784,84
EC1D3037005	----	818762,84
EC1D3037006	----	264282,71
EC1D3037007	----	765806,98
EC1D3037008	----	866457,67
EC1D3037009	----	511543,36
EC1D3037010	----	1097968,80
EC1D3037011	----	533571,77
EC1D3037012	GREAT WEST (Crespos)	1376751,64
EC1D3037013	----	856587,88
EC1D3037014	GUAGRAIALINA	330774,31
EC1D3037015	Quince	539694,99
EC1D3037016	----	158037,30
EC1D3037017	----	614958,68

Tabla 6.12. Proyección de la cobertura glaciar del Antisana para el año 2006

6.4 Inventario nacional proyectado al año 2006

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de este trabajo se elaboró el nuevo inventario para los glaciares del Ecuador para el año de 1997 (Tabla 6.13), faltando por confirmar los valores para las coberturas glaciares del Cayambe y Altar, obteniendo un valor de 60.6 km². Para el caso del Altar se tomó el valor de reducción promedio (59.8%) del casquete del Chimborazo que se encuentra muy próximo, sin embargo se debe tomar en cuenta que sus glaciares están ubicados a menor altitud lo que podría introducir otra incertidumbre sobre su proyección.

Para el caso del Cayambe se tomó el valor promedio (50.6%) del casquete del Antisana que también es muy próximo, en los dos casos las condiciones meteorológicas y morfológicas de la zona son muy semejantes, lo que lleva a pensar que el error que se comete por esta asunción no es muy grande y estaría en el orden del 4.6%.

Cordillera Occidental (Western Cordillera)

Montaña	Número de Glaciares	Area (Km ²)
<i>Iliniza</i>	10,00	0,41
<i>Carihuayrazo</i>	9,00	0,31
<i>Chimborazo</i>	22,00	11,82
		12,54

Cordillera Oriental (Eastern Cordillera)

Montaña	Número de Glaciares	Area (Km ²)
<i>Cayambe</i>	20	12,00
<i>Antisana</i>	17	15,32
<i>Cotopaxi</i>	19	14,83
<i>Altar</i>	6	5,95
		48,10

Tabla 6.13. Proyección de inventario para los glaciares del Ecuador a 1997

Si se toma en cuenta el valor de AAR₀ medido para los glaciares en Bolivia y que es del orden de 65.12% (Ginot et al., 2009), y se lo aplica a un glaciar ecuatoriano, en este

caso al Cotopaxi se encontró una variación media del orden de 43 metros, es decir en el caso de los glaciares ecuatorianos la ELA se encuentra más baja, ver tabla 6.14.

En la determinación de este coeficiente se tiene una incertidumbre, principalmente relacionada con la determinación exacta de los valores de balance en la zona de acumulación y en la determinación exacta del estado real de equilibrio del glaciar

Glaciar	Altura ELA (AAR ₀ =72,42%)	Altura ELA (AAR ₀ =65,12%)	Delta (m)
	Ecuador	Bolivia	
SINDIPAMPA	5240	5270	30
CARERO MACHAY	5145	5200	55
POTRERILLOS	4935	4975	40
PUCAHUAYCU NORTE	4930	4965	35
MUDADERO	4930	4990	60
CAJAS	4910	4960	50
TAMBOYACU	4940	4995	55
MANANTIAL	4830	4870	40
TAMBO	4910	4950	40
CHURRUMIHURCO	5050	5095	45
SIMARRONES	5150	5180	30
EL PICACHO	5220	5260	40
SAQUIMALA	5120	5150	30
SAN LORENZO	5110	5160	50
CAPULI-HUAICU	5210	5260	50
PUCAHUAYCU OESTE	5260	5300	40
CHANCHUNGA SUR	5240	5290	50
CHANCHUNGA NORTE	5210	5250	40
YANASACHA	5230	5260	30
Promedio	5083	5125	43

Tabla 6.14. Evolución de la línea de equilibrio para diferentes valores de AAR0 Caso del Cotopaxi

7 Discusión

7.1 Incertidumbre de los resultados

Para el casquete Glaciar del Cotopaxi se pudo establecer un pérdida del 20.2% tomando en cuenta el trabajo realizado con la fotografía del año 1997 que es de gran precisión, en base a este trabajo se realizó una reinterpretación del trabajo anterior (Jordan, 1983) que utilizó una fotografía del año 1976, encontrándose una diferencia del orden del 2%, debido a la utilización de puntos de control precisos y a la metodología empleada, dichos datos están incluidos en el inventario publicado por el WGMS. Esta interpretación fue realizada utilizando el Estereocord que era una de las mejores metodologías fotogramétricas para la época, siendo un método semi-analítico, la ventaja de este trabajo es que se pudo tener acceso a los documentos de base (aero triangulación) para incorporarlos en el análisis realizado con la fotografía de 1997 y 2006.

Desafortunadamente no se pudieron conseguir los trabajos de base para la interpretación para los glaciares restantes esto es Chimborazo, Antisana, Carihuayrazo, así como una lista y ubicación de los puntos de control utilizados. Estos fueron evaluados utilizando métodos planimétricos manuales disponibles a la época. Esto permite inferir que el error en la interpretación de las otras coberturas glaciares fácilmente puede estar en un valor cercano al 10%.

Esta observación se corrobora si se analizan los valores de las áreas correspondientes a cada uno de los glaciares del Antisana publicadas para el inventario anterior (*Jordan et al., 1999*) varios de los cuales consideran valores iguales, lo cual no corresponde a la realidad. Para el caso del Chimborazo se observó que los valores son más consistentes y presentan una evolución más real.

Si consideramos los valores de reducción de área de la lengua del glaciar 15 del Antisana medidos a partir del año 1997 hasta el 2006 y que suman un valor de 18.68% y asumiendo que este valor es promedio para todo el casquete, se aplicó este porcentaje a cada una de las lenguas del casquete del Cotopaxi obteniendo un valor de cobertura proyectado para el año 2006, si comparamos este valor con las mediciones realizadas sobre la orto fotografía generada se puede establecer un margen de error del 4.69 %, que será el error que se considera para al proyección del inventario al año 2006, se obtuvo un valor de 47.98 km² de cobertura para la cobertura glaciar del Ecuador.

Complementariamente si se toma en cuenta el valor del área que se mide sobre la mayor parte de la cobertura glaciar del Carihuayrazo para el año 2006 se obtiene un valor bastante cercano al proyectado para este glaciar, lo que confirmaría la cercanía de la proyección realizada a la verdadera cobertura in situ la cual se la evalúa cada año mediante topografía aprovechando el pequeño tamaño de este.

Para la determinación de la línea de equilibrio para cada una de las lenguas glaciares se utilizó el valor promedio del área promedio de acumulación (A.A.R.) medido para el glaciar 15 del Antisana durante 14 años (72,42%), valor que se lo determinó partir del cálculo de la línea de equilibrio (E.L.A). En la determinación de este valor se han introducido errores debido a la no estimación exacta de la acumulación neta debido principalmente a problemas relacionados con la identificación clara del inicio y fin del ciclo hidrológico al realizar la estratigrafía en los pozos, debido a que los períodos de derretimiento son frecuentes durante el verano y la época de acumulación, período que no está exclusivamente concentrado sobre la época seca, adicionalmente las caídas de nieve producidas durante la época seca introducen una incertidumbre adicional.

7.2 Posibles razones para el retroceso

Hablar específicamente sobre las razones que producen el retroceso de los glaciares en el Ecuador no esta dentro del alcance de la presente investigación, anteriormente se han realizado trabajos que topan este aspecto desde diferentes puntos de vista como son : la influencia del clima a nivel regional (*Francou et al., 2004,2005 ; Jordan et al., 2005; Vuille et al.,2007*), punto de vista climático tomando en cuenta la evolución de las temperaturas (*Maisincho, 2009*), los procesos físicos relacionados con la fusión (*Favier et al., 2004a, 2004b*) y el punto de vista hidrológico (*Villacís, 2008*). Se enunciaran las posibles causas de este retroceso en relación con las evaluaciones realizadas.

De la evolución del balance de masa observada sobre dos grandes glaciares de Bolivia y Ecuador (Zongo y Antisana) durante los últimos 15 años se puede observar que existe una fuerte variabilidad inter anual. El mismo fenómeno se lo ha podido observar sobre dos pequeños glaciares de Bolivia (Chacaltaya y Charquini).(*Francou et al., 2005*).

Para el Ecuador el valor de pérdida promedio es de 610 mm equivalentes de agua por año, para los glaciares pequeños se estima valores de pérdida del orden de 1300 mm equivalentes de agua por año. En relación con las condiciones actuales de la variabilidad climática se puede decir que los glaciares que poseen una vasta área de acumulación (Cayambe, Antisana, Cotopaxi, Chimborazo) ubicada a gran altitud (> 5040 m.s.n.m...) pueden de alguna manera compensar los déficit producidos en largos períodos de ablación. En contraste los pequeños glaciares (Iliniza, Carihuayrazo, Altar) ubicados a menor altitud están sometidos a balances negativos permanentes, estos glaciares se encuentran extremadamente desbalanceados y están en riesgo de desaparecer completamente se estima durante las dos próximas décadas.

Para el glaciar 15 del Antisana se ha podido documentar una variabilidad interanual significativa que se distribuye a lo largo de todo el año. La estacionalidad de la acumulación a gran altura no es bien conocida debido a la realización de una sola medida anual (comienzo del ciclo de acumulación) (*Francou et al., 2005*).

Los meses que presentan una acumulación mayor son los ciclos correspondientes a abril-junio y septiembre-octubre, dos períodos más constantes y que presentan una ablación moderada son junio-julio y noviembre-enero. Los meses más variables son febrero, marzo, abril, mayo, agosto y septiembre que pueden explicar más del 98% de la varianza total del balance de masa anual. (*Francou et al., 2005*).

El balance de masa sobre la zona de ablación refleja a escala mensual la evolución del balance de energía sobre la superficie del glaciar. Sobre el glaciar 15 del Antisana se han observado altas tasas de ablación desde el 2001. La rápida respuesta del glaciar al clima regional refleja en parte la débil estacionalidad del clima en los sectores cercanos al Ecuador, la variabilidad climática es transmitida al glaciar en cualquier periodo del año. (*Favier et al., 2004; Francou et al., 2005*).

Para el glaciar 15 del Antisana se encontró que los períodos de fuerte ablación y de ablación débil o acumulación coinciden con las anomalías cálidas y frías del Pacífico Ecuatorial (MEI index). Las dos fases opuestas del ENSO explican en su mayor parte las situaciones contrastantes observadas sobre el glaciar. Se estableció una correlación entre la SST (temperatura superficial del mar) para el bloque Niño 4 con la ocurrencia del balance de masa y se pudo establecer un período de respuesta con un desfase de tres meses. (*Francou et al. 2004*). Actualmente se están realizando trabajos complementarios para explicar de mejor manera la relación con los cambios ocurridos en los últimos 8 años. (*Francou, Vuille, Cáceres en proceso*).

El incremento de la temperatura superficial del mar (SST) costa afuera de Sud América observado desde el cambio (forzamiento) del clima del Pacífico en 1976/1977, muy probablemente ha contribuido para la aceleración del retroceso de los glaciares en el Ecuador. Esta fuerte señal que viene desde el Pacífico muy probablemente es perturbada por fenómenos atmosféricos a gran escala como fue el ocurrido en 1991 por la erupción del Pinatubo (*Francou et al., 2004*) y más recientemente pero de manera más localizada la erupción del Reventador y Tungurahua que afectan a los glaciares del Cayambe, Antisana y Chimborazo por las caídas de ceniza que afectaron la evolución natural de la ablación sobre estos casquetes glaciares (*Ginot et al., 2010*).

Se puede asumir que la mayor frecuencia de ocurrencia del fenómeno del Niño desde mediados de 1970 en combinación con el calentamiento de la troposfera sobre los Andes tropicales muy probablemente ayuda a explicar el dramático derretimiento de los glaciares en el Ecuador.

8 Conclusiones

1. Tomando como base el inventario publicado por *Jordan y Hastenrath en 1999*, y considerando que es la primera recopilación sistemática de las coberturas glaciares y que fue publicada en detalle por el WGMS (World Glacier Inventory) en su sitio Web, se pudo evaluar una pérdida de cobertura de 37.6 % hasta el año 1997, la evaluación realizada por los mencionados autores toma como punto de partida años diferentes, así por ejemplo para el Antisana fue 1956, Cayambe 1956, Chimborazo 1962, Iliniza 1962, Carihuayrazo 1962, Altar 1965, Cotopaxi 1976, razón por la cual no se puede tomar un solo año como punto de partida, se puede eso si decir que el porcentaje de reducción real es al año 1997, se puede inferir que el retroceso sobre las coberturas glaciares del Ecuador es más o menos homogéneo sobre todas ellas, ya que todas están sujetas a las mismas influencias climáticas y tienen unas características fisiográficas muy similares .
2. De manera general se puede decir que los glaciares con una exposición hacia la vertiente este Amazónica sufren una reducción menor que los glaciares que se encuentran expuestos hacia la vertiente oeste o Pacífica, de la evaluación real realizada sobre los tres casquetes se obtuvo un valor promedio de $39.1 \pm 2\%$ y $45.9 \pm 2\%$ respectivamente. Cabe mencionar que este valor corresponde a la tendencia predominante ya que por la disponibilidad de fotos de buena calidad con una resolución adecuada para los años correspondientes y de datos para los mismos años del inventario detallado no se pudo realizar una comparación más precisa para establecer el valor real de reducción.
3. La tendencia observada sobre las evaluaciones se ajusta con las observaciones realizadas sobre la ocurrencia de precipitaciones sobre el flanco este de las dos cordilleras. Un factor importante es el efecto de barrera que se produce cuando las masas cargadas de gran humedad que vienen desde la cuenca Amazónica chocan con la cordillera produciendo la descarga de una gran cantidad de humedad sobre los flancos. Valor que es mayor al observado sobre el flanco oeste y que está influenciado por la vertiente Pacífica, de manera general más seca. También se considera tiene relación con la altura a la que ocurren las precipitaciones sobre el flanco este las precipitaciones ocurren a menor altitud y son más intensas.
4. Tomando en cuenta los datos medidos sobre el Cotopaxi, el cual ha merecido una especial atención debido a sus características, se realizó una proyección sobre las coberturas glaciares al año 2006, obteniendo una cobertura de 47.98 Km^2 con un error estimado del 4.6%. Los resultados obtenidos se los puede observar sobre la **Tabla 8.1**.

Cordillera Occidental (Western Cordillera)

Montaña	Número de Glaciares	Area (Km ²)
<i>Iliniza</i>	10	0,32
<i>Carihuayrazo</i>	9	0,24
<i>Chimborazo</i>	22	9,43
		10,00

Cordillera Oriental (Eastern Cordillera)

Montaña	Número de Glaciares	Area (Km ²)
<i>Cayambe</i>	20	9,30
<i>Antisana</i>	17	12,23
<i>Cotopaxi</i>	19	11,84
<i>Altar</i>	6	4,61
		37,98

Tabla 8.1. Proyección de inventario para los glaciares del Ecuador al 2006

5. Se considera que la nueva evaluación para el inventario de los glaciares del Ecuador suministra valores más precisos sobre estas, por las limitaciones de disponibilidad de material y de puntos de control precisos para las áreas del Cayambe y Altar no se aplicó esta metodología de evaluación sobre los datos reales, actualmente se tiene evaluado el 71% de la cobertura total de manera real (fotogrametría digital), si consideramos el error del 4.6% podemos inferir que el valor dado de 60.6 Km² nos da una idea bastante aproximada sobre el estado de los Glaciares en el Ecuador. Siendo actualmente la evaluación más precisa realizada sobre las coberturas glaciares.
6. El conocimiento preciso sobre las coberturas glaciares en el caso de volcanes activos o potencialmente activos es de gran importancia para realizar una evaluación sobre los posibles volúmenes de lahares que se producirían en el caso de ocurrir un evento volcánico de magnitud. Los datos obtenidos para la evaluación realizada sobre el volcán Cotopaxi ya han sido utilizados para realizar modelaciones sobre este fenómeno. Es de esperar que en el futuro con los resultados obtenidos sobre otra cobertura glaciar bastante importante como es el Chimborazo se realice el mismo estudio. Esto demuestra la utilidad que se le puede dar a los datos generados.
7. De los resultados obtenidos sobre la evaluación de las tres coberturas glaciares estudiadas se puede decir que la reducción de estas en el Ecuador es generalizada, la misma que se ha incrementado a partir de los años ochenta tal como lo muestran los resultados mostrados.
8. Se puede decir que la respuesta de los glaciares Ecuatorianos frente al cambio climático observado en las últimas décadas es la misma a lo largo de las dos Cordilleras y sobre los dos flancos.
9. La evaluación realizada puede servir como base para futuros estudios sobre la disponibilidad del recurso agua en relación con las coberturas glaciares.

10. Los resultados que muestran una reducción indiscutible de las coberturas glaciares ecuatorianas concuerdan con los estudios realizados en otros sitios del planeta y su relación con los cambios climáticos observados y la posible influencia del Calentamiento Global sobre estas.
11. De acuerdo con estudios realizados con la evolución de la temperatura y precipitación se estima que para los próximos diez años el pie de los glaciares ecuatorianos se encuentre a una altura aproximada de 4975 m.s.n.m. (*Maisincho, 2009*) si comparamos este valor con la evolución observada en los últimos años sobre el Cotopaxi, Chimborazo y Antisana se infiere que es muy probable que esta proyección sea cierta, para un período de tiempo más largo se considera que la predicción presenta más incertidumbres.

9 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar los estudios complementarios a este trabajo que consisten básicamente en la toma de puntos de control de precisión en la zona de las coberturas glaciares del Cayambe y Altar, con la finalidad de confirmar o rechazar los valores estimados para las coberturas del año 1997 que son las que se evaluaron de manera directa sobre las fotografías.
2. Se recomienda de ser el caso utilizando los nuevos puntos de control, realizar una reinterpretación de los trabajos realizados por *Hastenrath* y *Jordan* en las zonas que sea posible para confirmar o rechazar las hipótesis del presente trabajo, de manera inicial se realizó la reinterpretación del trabajo del Cotopaxi para 1976 encontrándose una diferencia del orden del 2%. Este sería el tema de un trabajo posterior, el cual se encuentra fuera del alcance del presente trabajo.
3. Con la finalidad de poder realizar los procesos de comparación correspondientes y considerar intervalos de tiempo igual se recomienda la toma periódica de fotografía aérea a una resolución y escala adecuada con la finalidad de documentar de mejor manera la evolución de las coberturas glaciares. Por ejemplo cada cinco años.
4. El presente trabajo puede ser tomado como base de referencia para futuros estudios sobre las coberturas glaciares y complementarlo con un estudio multitemporal en los casos que este sea posible de realizar, dependiendo de la calidad de fotos y de su resolución, como ejemplo este trabajo ya fue realizado sobre el Cotopaxi, obteniéndose resultados bastante halagadores. Para ello se consideraron todas las fotografías existentes, de ellas no todas fueron explotables por su calidad.
5. En base a este trabajo y con la utilización complementaria de resultados de mediciones de espesor realizadas sobre los casquetes se puede realizar una modelación y posterior estudio sobre los riesgos glaciares asociados (lahares). De igual manera este trabajo fue realizado de manera preliminar sobre el casquete del Cotopaxi de manera parcial. Es recomendable que estos estudios sean complementados y extendidos a las otras coberturas glaciares que presentan un riesgo alto (Chimborazo, Cayambe).

6. Con los resultados obtenidos de los estudios multitemporales se puede hacer un estudio sobre la relación entre el avance o retroceso de los glaciares y su relación con el cambio climático. Esta temática actualmente es considerada de gran interés para conocer la disponibilidad del recurso agua en las cuencas de alta montaña, por lo tanto es altamente recomendable apoyar los trabajos complementarios futuros propuestos en relación con el presente trabajo.
7. Se recomienda la adquisición de todos los documentos fotográficos existentes con la finalidad de establecer una base de información sobre los glaciares del Ecuador, las primeras fotos datan del año 1956 y fueron tomadas por el IGM, también sería deseable recopilar toda la información cartográfica existente de las zona de interés.
8. Se recomienda remitir los datos generados en el presente estudio para actualizar las coberturas glaciares ecuatorianas que constan en la base de datos del WGMS, la última actualización fue realizada en el año 2002 con los datos generados por Jordan y Hastenrath.

Bibliografía

- Acituno, P., 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Mon. Wea. Rev.*, 116,505-524.
- Alvarado, A., 1998. Variation du champ de contrainte et de de´formation et quantification des de´formations actives du bloc co^ tier de l'Equateur. DEA de Ge´odynamique et physique de la terre Thesis, Paris XI, centre d'Orsay, Orsay, 54 pp.
- Ames A., Francou B., Cordillera Blanca, Perú. Glaciares en la Historia. *Bull. Inst. Fr. Et. And.* 24 (1995) 37-64.
- Andrade D., Hall M., Mothes P., Troncoso L., Eissen J.P, Samaniego P., Egred J., Ramón P., Rivero D., Yopez H., 2005. Serie los peligros volcánicos en el Ecuador #3. Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi. Corporación Editora Nacional, IG-EPN-IRD.
- BLUH200 (© Dr.-Ing. Karsten Jacobsen, IPI, Universität Hannover)
- Cáceres, B., 2000. Comportamiento de un glaciar de Los Andes Ecuatorianos en relación con los factores climático. Estudio realizado en el glaciar 15 Alfa del Antisana. Tesis de Grado. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Civil. Quito
- Cáceres, B., 2002. "Comportamiento de un Glaciar de la Cordillera Real del Ecuador en relación con los factores climáticos, cambios geométricos registrados sobre el glaciar en el período 1995-2001. Estudio realizado en el glaciar 15 alfa del Antisana. Tesis de grado. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Geología minas Petróleo y Ambiental Quito

- Cáceres, B., 2003. Evolución de los glaciares del Cotopaxi. Informe INAMHI-Universidad de Dusseldorf
- Cáceres 2003. Informe de pasantía Universidad Heinrich Heine. Duesseldorf Alemania. 2003. No publicado.
- Cáceres, B., 2005. Evaluación reciente del área del casquete glaciar del volcán Cotopaxi mediante la utilización de Fotogrametia digital. Memorias XII Congreso Latinoamericano de Geología Quito
- Cáceres B., 2007. Actualización para el Inventario de los Glaciares del Ecuador. Resultados Preliminares, mayo 2007.UNAM- México. Comunicación oral.
- Cáceres, B., 2008. Upgrade of the inventory for the Glaciers of Ecuador. WGMS Fog 9 2000-2005.WGMS-UNESCO-PHI .
- Cáceres, B., 2008. Evaluación geométrica del casquete glaciar del volcán Cotopaxi usando fotogrametría digital. Revista técnica Sigma. Colegio de Ingeniero civiles de Pichincha (CICP). Quito
- Cáceres ,B., Francou ,B., Favier ,V., Bontron, G., Tachker ,P., Bucher ,R., Taupin, J.D., Vuille, M., Maisincho, L., Delachaux, F., Chazarin, J.P., Cadier, E.,Villacis, M. 2006. El glaciar 15 del Antisana investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico .Climate Variability and Change— Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publ. 308, 2006.
- Cáceres, B., Francou, B., Favier, V., Bontron, G., Maisincho, L., Tachker, P., Bucher, R., Taupin, J.D., Delachaux, F. & Chazarin, J.P, 2007.El glaciar 15 del Antizana. Diez años de investigaciones glaciológicas.Proceedings of the First International Conference on the Impact of Climate Change on High-Mountain System, IDEAM, Bogota, Novembre 2005, 63-74.
- Cáceres, B., Jordan, E., Ungerechts, L., Francou, B., Peñafiel A., 2005.Evaluación Geométrica del Casquete Glaciar del Volcán Cotopaxi usando Fotogrametría Digital. Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Geología. Quito.
- Cáceres ,B., Jordan, E., Ungerechts, L., Francou, B., Peñafiel A. Hastenrath S. 2008. Actualización del inventario para los glaciares Del Ecuador. Resultados Preliminares. X Congreso Ecuatoriano de Geología. Memorias. Loja
- Cáceres, B., Maisincho, L., Manciat, C., Loyo, C., Cuenca, E., Villacís, M., Freire, D., Francou, B., Cadier, E., Guamanzara, C. 2008. Glaciares del Ecuador: Antisana y Carihuayrazo. Informe del año 2006.
- Cáceres, B., Ramírez, J., Francou, B., Eissen, J., Taupin, J., Jordan, E., Ungerechts, L., Maisincho, L., Barba, D., Cadier, E., Bucher, R., Peñafiel, A., Samaniego, P., Mothes, P., 2004. Determinación del Volúmenes del Casquete de Hielo del Volcán Cotopaxi. Informe INAMHI-IRD-IGEPN-INGEOMINAS.

- Cadier, E., Maisincho, L., Ulloa, D., Mella, R., Mothes, P., Schaeffer, M., Francou, B., Rivero D., Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres, B., Barba, D., David, E., Samaniego, P. 2007. Segunda campaña de mediciones de los glaciares del volcán Cotopaxi 19-27 de enero 2007. Informe provisional
- Clapperton, C.M., Hall, M., Mothes, P., Hole, M.J., Still, J.W., Helmens, K.F., Kuhry, P., Gemmell, A.M.D., 1997. A Younger Dryas Icecap in the Ecuadorian Andes. *Quaternary Research* 47, 13-28.
- Collot, J.Y., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P., Graindorge, D., Gutscher, M.-A., Spence, G., 2004. Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the Northern Ecuador– southwest Colombian margin. *Journal of Geophysical Research* 109, B11103.
- Coudrain A., Francou B., Zbigniew W. Kundzewicz. Glacier shrinkage in the Andes and consequences on water resources—Editorial. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 50(6) December 2005.
- De Mets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S., plate motions. *Geophys. J. Int.* 101, 425– 478.
- Deniaud, Y., 2000. Enregistrements sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes Equatoriennes au cours du Néogène: Etude des bassins d'avant arc et bilan de masse. *Géologie Alpine, Mémoire HS (32)*, 159.
- Dumont, J.F., Lavenu, A., Ortlieb, L., Guillier, B., Alvarado, A., Benitez, S., Jouannic, C., Martinez, C., Labrousse, B., Poli, J.T., 1997. Extensional tectonics in the coastal block of Ecuador: preliminary results and implications. Workshop on Late Quaternary Coastal Tectonics, London.
- Dumont, J.F., Santana, E., Vilema, W., 2005. Morphologic evidence of active motion of the Zambapala Fault, Gulf of Guayaquil (Ecuador). *Geomorphology* 65, 223– 239.
- Ego, F., Sebrier, M., Lavenu, A., Yepes, H., Eguez, A., 1996. Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics* 259, 101– 116.
- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J.-P., Maisincho, L., Coudrain, A., 2004a: One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana glacier 15, Ecuadorian Andes. *J. Geophys. Res.*, 109, D18105, doi:10.1029/2003JD004359.
- Favier, V., Wagnon, P., Ribstein, P., 2004b: Glaciers of the outer and inner tropics: A different behavior but a common response to climatic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16403, doi:10.1029/2004GL020654.

- Francou, B., 2004. Andes del Ecuador: los glaciares en la época de los viajeros (Siglos XVIII a XX). In J.P. Deler & E. Mesclier (eds), Los Andes el reto del espacio mundo Andino homenaje a Olivier Dollfus, Lima IFEA-IEP, 137-152
- Francou, B., Pizarro, I., 1985. El Niño y la sequía de los Altos Andes (Perú y Bolivia). Bull. Assoc. Et. And., 14, 1-2 : 1-18
- Francou, B., Poyaud, Métodos de observación de Glaciares .versión-1: 2004 .IRD, IHH, INAMHI, INRENA, LGGE, Ingeominas.EMAAP-Q.
- Francou, B., E. Ramirez, B. Cáceres, and J. Mendoza (2000), Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century. Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador, *Ambio*, 29(7), 416–422.
- Francou B., Ribstein P., Wagnon P., Ramirez E., Pouyau B., Glaciers of the Tropical Andes, indicators of the global climate variability. In : U. Huber, K.M. Harald, M. A. Reasoner (Ed.), *Global Change and Mountain Regions: A State of Knowledge Overview*, Kluwer Academic Publishers, IMRI 2005 in press.
- Francou, B., Vincent, V. Les glaciers à l'épreuve du climat. Ird Editions & Editions Belin. París 2007.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B. (2004) New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'. *J. Geophys. Res.* 109, DOI 10.1029/2003JD004484.
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., Sicart J.M., 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S, *J. Geophys. Res.* 108 (D5) 1.1–1.12.
- Ginot, P., Ramallo, C., Rojas, F., Fuertes, R., Perroy, E., Mendoza, J., Litt, M., 2009. Glaciares Zongo-Chacaltaya-Charquini Sur. Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas & Meteorológicas. Año hidrológico 2007-2008.
- Ginot, P., Schotterer, U., Stichle, W., Godoi, M.A., Francou, B., Schwikowski, M. Influence of the Tungurahua eruption on the ice core records of Chimborazo, Ecuador. *The Cryosphere Discuss.*, 4, 1343–1363, 2010. www.the-cryosphere-discuss.net/4/1343/2010/ doi:10.5194/tcd-4-1343-2010. © Author(s) 2010. CC Attribution 3.0 License.
- Haeberli, W. 1998. Historical evolution and operation aspects of worldwide glacier monitoring. in *Into the second century of worldwide glacier monitoring: prospects and strategies*. Studies and reports in hydrology, No. 56. edited by W. Haeberli, M. Hoelzle, and S. Suter. UNESCO Publishing, Paris. pp 36-52.
- Haeberli, W. and Wallen, C.C. 1992. *Glaciers and the Environment*. UNEP GEMS, Nairobi, Environment Library No. 9, 24 pp.

- Hall M., Beate B. 1991. El Volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana, estudios de Geografía Vol. 4. 5-18.
- Hall ,M., Mothes ,P., 1994 : Tefroestratigrafía Holocénica de los volcanes principales del Valle Interandino, Ecuador. El contexto geológico del espacio físico Ecuatoriano - Neotectónica, Geodinámica, Volcanismo, Cuencas sedimentarias, Riesgos Sísmico. R. Marocco. Quito, Ecuador, Corporación Editora Nacional & Colegio de Geógrafos del Ecuador: 47-67.
- Hall M., Mothes P., Samaniego P., Yepes H. & Andrade D., 2004 : Mapa Regional de los peligros potenciales del volcán Cotopaxi Zona Norte. Ech. 1/ 50.000. Edit. IGM-IG/EPN-IRD-Embajada de Alemania en Quito. Hall M.L., Mothes P., Samaniego P., Andrade D. & Yepes H., 2004 - Mapa Regional de los peligros potenciales del volcán Cotopaxi – Zona Sur. Ech. 1/50.000. Edit. IGM-IG/EPN-IRD-Embajada de Alemania en Quito.
- Hastenrath, S. 1981. The glaciation of Ecuadorian Andes. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hastenrath S., 1991. Climate Dynamics of the Tropics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Heine, K., 1995a. Bedded Slope deposits with respect to the Late Quaternary Glacial Sequence in the High Andes of Ecuador and Bolivia. In: Slaymaker, O. (Ed.), Steepland Geomorphology. Wiley, New York, pp. 257}278.
- Heine, K., 1995b. Late Quaternary glacier advances in the Ecuadorian Andes: a preliminary report. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula 9, 1}22.
- Heine, K., 1996a. The extent of the last glaciation in the Bolivian Andes (Cordillera Real) and paleoclimatic implications. Zeitschrift fur Geomorphologie N.F., Suppl. Bd. 104, 187,202.
- Heine, K., Heine J.T. 1996b. Late Glacial Climatic Fluctuations in Ecuador: Glacier Retreat during Younger Dryas Time. Arctic and Alpine Research. Vol 28, No 4, , pp. 496-501
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

- Jomelli, V., et al., Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (2009), doi:10.1016/j.palaeo.2008.10.033.
- Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffmann, G., Francou, B. Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review. In press. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.2009.
- Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D., Favier, V., Francou, B., 2006 . Little Ice Age glacial extension in Ecuador from lichenometry and historical observations paleoclimatic implications No publicado
- Jordan E., 1983. Die Vergletscherung Des cotopaxi-ecuador. *Zeitschrift Für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 9 (1), Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 73-102.
- Jordan, E., 2007. Informe restitución fotogramétrica del volcán Cotopaxi DALE Digital. Inédito. Quito.
- Jordan E., Blanco D.,Castillo, K.,Cruz, M.,González, J.,Torres, J.,Ungerechts, L.,Peñañiel, A.,Cáceres, B.,Francou, B.,Primer ortofotomapa del Chimborazo (Ecuador) y su valor como diagnóstico para cambios climatológicos en relación con otros glaciares tropicales.VII Encuentro internacional de investigadores del grupo de trabajo de nieves y hielos de América Latina del PHI-UNESCO. Bogota 2008
- Jordan, E., Cáceres, B., Francou, B., Ungerechts, L., 2003. Die Glazialforschungen Hans Meyers aus heutiger Sicht Wertung der wissenschaftlichen Leistungen Meyers in den Hochanden von Ekuador aus aktueller Sicht und Ausblick auf die geographischen Forschungsergebnisse der vergangen 100 Jahre. Die Anden – Geographische Erforschung und künstlerische Darstellung. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* 37, München 2003, S. 159-193.
- Jordan, E., Hastenrath, S., 1999: Glaciers of Ecuador. In: Williams, R.S., Ferrigno, J.G., (Eds.), *Satellite image atlas of the glaciers of the world - South America*. USGS Professional paper 1386-I, 31-50.
- Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres B., Francou B., Peñañiel A., Francou B., 2005: Estimation by Photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (6) December 2005, pp 949-961.
- June 2009 - L. Ballagh added the Chilean glacier updates from CEAZA. Updates were made to the Data Sources, Data Format, Quality Assessment and History of Updates, and Revision Date sections of this document.
- Kaser, G., 1995. Some notes on the behaviour of tropical glaciers. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines* 24 (3)., 671–681.

- Kaser, G., 1996. Gletscher in den Tropen-ein Beitrag zur Geographie der tropischen Hochgebirge. Habilitationsschrift, Universität Innsbruck.
- Kaser, G., 1998. The Nature of Tropical Glaciers. International Hydrological Series. UNESCO-Cambridge Univ. Press (accepted and in preparation). English version of: Kaser, G., 1996. Gletscher in den Tropen-ein Beitrag zur Geographie der tropischen Hochgebirge. Habilitationsschrift, Universität Innsbruck.
- Kaser, G., 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change* 22(1999) 93-103.
- Kaser G., Georges C., 1997. Changes of the equilibrium-line altitude in the tropical Cordillera Blanca, Peru, 1930-50, and their spatial variations. *Ann. Glaciol.* 24 (1997) 344-349.
- Kaser, G., Georges, C., 1999: On the mass balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca. *Geograf. Ann.*, 81A(4), 643-651.
- Kaser, G., Hastenrath, S., Ames, A., 1996. Mass balance profiles on Tropical glaciers. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.* 32, 75-81.
- Kaser, G., 2002a: Glacier mass balance and climate in the South American Andes. In: Casassa, G., Sepulveda, F.V., Sinclair, R.M., (Eds.): *The Patagonian Icefields*, 89-100.
- Kaser, G., Osmaston, H., 2002b: *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kellogg, J.N., Vega, V., 1995. Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. In: Mann, P. (Ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, vol. 295, pp. 75-90.
- La Condamine, C., 1751. *Journal du voyage fait par ordre du roi à l'Equateur servant d'introduction historique à la mesure des trois premiers degrés du Méridien*. Imprimerie Royale, Paris. 266 pp.
- Lewis G.E., 1956. Andean geologic province, pp. 269-291. In : W.F. Jenks, ed., *Handbook of South America Geology*. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 65, 378 pp.
- Linder W. 2006 *Digital Photogrammetry - A Practical Course* (3rd edition, Springer, ISBN 978-3-540-92724-2)
- Linder, W., 2009. *Manual lisa Foto. Ver 4.5*. LISA Geo-Software GmbH . Ludwig-Erhard-Ring 30 D 54296 Trier

- Maisincho, L., 2009. Reconstrucción y predicción de la evolución del balance de masa y la línea de nieve del Glaciar 15 Alfa del Antisana usando un modelo degree-day. PREFALC (Programa Regional Francia-América Latina y el Caribe).
- Matthes, F.E., 1939. Report of the comitee on glaciers. Transaction American Geophysical Union, 20,518-523.
- Meyer ,H., 1907. In den Hoch Anden von Ecuador, 2 vols. Dietrich Reimer-Ernerst Vohsen, Berlin. Vol 1, 522 pp, Vol 2, picture Atlas.
- Mothes P., Hall M. , Janda R.J., 1998 - The enormous Chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador. Bulletin of Volcanology,59(4):233-244.
- Mothes P. 2004. Flujos de lodo asociados con las erupciones del volcán Cotopaxi. Informe inédito para EMAAP_Q, 52 p.
- Muller ,F., Caflisch, T., Muller, G., 1978,(a). Instruction for compilation and Assemblage of data for a worl Glacier Inventory. Department of Geography Swiss federal Institute of technology ETH.
- Muller ,F., 1978 (b). Instruction for compilation and Assemblage of data for a world Glacier Inventory. Supplement identification Glacier number. Department of Geography Swiss federal Institute of technology ETH.
- Polissar, P.J., Abbott, M.B., Wolfe, A.P., Bezada, M., Rull, V., Bradley, R.S., 2006. Solar modulation of Little Ice Age climate in the tropical Andes. PNAS 103, 8937–8942.
- Rabatel, A., 2005. Reconstruction et interprétation paléoclimatique des fluctuations glaciaires dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle). Ph.D. Thesis, IRD, CNRS, Univ. J. Fourier, Grenoble, 192 p.
- Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P., Grancher, D., 2008. A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16S) based on moraine dating by lichenometry: implications for climate reconstruction. Quaternary Research 70,198–212.
- Rabatel, A., Jomelli, V., Francou, B., Naveau, P., Grancher, D., 2005. Dating Little Ice Age in the tropics from the moraines of Charquini glaciers (Andes of Bolivia, 16S). CRAS, Géosciences 337, 1311–1322.
- Rabatel, A., Machaca, A., Francou, B., Jomelli, V., 2006. Glacier recession on Cerro Charquini (Bolivia, 16°S) since the maximum of the Little Ice Age (17th Century). Journal of Glaciology 52, 110–118.

- Ramirez, E., Francou, B., Ribstein, P., Descloîtres, M., Guérin, R., Mendoza, J., Gallaire, R., Pouyaud, B., Jordan, E., 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes. A case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S), *J. Glaciol.* 47 (2001) 187–194.
- Ronchail, J., 1995: Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia', *Bull. Inst. fr. etudes andines*, 24, 369–378.
- Saber, W., 1965. Geología del Ecuador. Primera edición. Editorial Ministerio de educación.
- Santana, E., Dumont, J.F., 2002. The San Lorenzo Fault, a new active fault in relation to the Esmeraldas–Tumaco seismic zone. 5th International Symposium on Andean Geodynamics. IRD, Toulouse, pp. 577–580
- Sauer, W., 1950. Contribuciones para el conocimiento del cuaternario en el Ecuador. *Anales de la Universidad Central*, Quito, 77 (328) : 327-364.
- Sauer, W., 1971. Geologie von Ecuador. (Beiträge zur Regionalen geologie der Erde, Vol.11). Gebrüder Borntraeger, Berlin Stuttgart, 316 pp.
- Sicart, J.E., Wagnon, P., Ribstein, P., 2005: Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). *J. Geophys. Res.*, 110, D12106, doi:10.1029/2004JD005732.
- Thouret, J.C. 1990. Effects of the November 13, 1985 eruption of the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz, Colombia. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, No 41.
- Villacís, M., 2008. Recursos hídricos de origen glaciar en los Andes del Ecuador en relación con las variaciones del clima: Caso del volcán Antisana (en francés). Ph.D. Thesis, Université Montpellier II, Montpellier, 231 pp.
- Villacís, M., Cadier, E., Pouyaud, B., Cáceres, B., Núñez, J., Galárraga, R., Francou, B., 2009. ¿Por qué estudiar la interacción entre los aportes de agua de origen glaciar y del páramo en cuencas del Ecuador?. *Actas de PARAMUNDI, 2do congreso Mundial de Páramos*. Loja, Ecuador del 22 al 27 de junio de 2009
- Villalba, R., Grau, H. R., Boninsegna, J. A., Jacoby, G. C., Ripalta, A., 1998: Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America. *Int. J. Clim.*, 18, 1463–1478.
- Vincent C., Ribstein P., Favier V., Wagnon P., Francou B, Le Meur E., Six D. 2005. *Geoscience* 337 97–106
- Vuille, M., Bradley, R. S., 2000a: Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3885–3888.

Vuille, M., Bradley, R. S., Keimig, F., 2000b: Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperatures anomalies. *J. Climate*, 13, 2520-2535.

Vuille, M., Bradley, R., Francou, B., Kaser, G., Mar, G., 2007. Climate Change in the tropical Andes –Impacts and consequences for glaciation and water resources .Part I: The scientific basis. Report CONAM.

Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M., Keimig, F., 2003: 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, 59(1-2), 75-99.

Wernr Z., 1979. The Andes A geological review. B3eitrage zur Regionalen Geologie der Erde. Institute fu`r Geologie und paleontologie. Technishe Universitat Berlin.

Whymper, E. 1892. Travels amongst the Great Andes of Ecuador , Londres

Ref : WGMS web site :

http://nsidc.org/data/glacier_inventory/

http://nsidc.org/data/docs/noaa/g01130_glacier_inventory/