

Erupciones del volcán Nevado del Huila, en febrero y abril de 2007, y los cambios en su masa glaciar

ERUPTIONS OF THE NEVADO DEL HUILA VOLCANO IN FEBRUARY AND APRIL 2007 AND THE CHANGES IN ITS GLACIAL MASS

BERNARDO **Pulgarín**¹
 CARLOS E. **Cardona**¹
 CRISTIAN C. **Santacoloma**¹

ADRIANA **Agudelo**¹
 MARTA L. **Calvache**²
 MARÍA L. **Monsalve**¹

RESUMEN

El volcán Nevado del Huila se encuentra localizado al SW de Colombia; su comportamiento ha sido principalmente efusivo y de composición predominantemente andesítica, aunque en su último desarrollo se han generado flujos de lava, domos y algunos flujos piroclásticos. El 18 de febrero y el 17 de abril de 2007 se registraron eventos eruptivos freáticos; los cuales estuvieron asociados a una columna de aproximadamente 4 km de altura, formación de una fisura de 2 km de largo en dirección N-S, reacomodación del sistema de grietas glaciares preexistentes, generación de cenizas que cubrieron el pico Central, una nueva fisura que atravesó los costados SW y NE del pico Central con una longitud de 2,3 km, pérdida parcial del glaciar El Oso (al E) y formación de dos lahares pequeños que se encaminaron por los cauces de los ríos Páez y Símbola, afectando importante infraestructura vial y dejando incomunicada la población del área de influencia del volcán. Hasta la actualidad, los cambios morfológicos que ha venido sufriendo la masa glaciar incluyen fusión paulatina, debido a la interacción con los gases calientes que emanan permanentemente de las fumarolas presentes a lo largo de las dos grandes fisuras generadas recientemente, basculamiento y fusión de bloques de hielo cercanos a los bordes de estas grandes fisuras; y pérdida parcial de algunos frentes de lenguas glaciares.

Estudios anteriores sobre el retroceso glaciar en el volcán estimaban la desaparición de esta masa glaciar hacia los años 60-70 de este siglo, sin considerar en esta tendencia aceleraciones debidas a erupciones volcánicas o sismos. Por tanto, estos cambios, causados por la reciente actividad volcánica y los efectos posteriores a ella, seguramente están generando un retroceso glaciar mucho más acelerado, que llevará a una extinción más rápida de esta masa glaciar.

Palabras clave

Volcán Nevado del Huila, erupción freática, flujo de lodo, fisura, retroceso glaciar.

ABSTRACT

The volcano Nevado del Huila is located in southwest Colombia. Its behavior has been mostly effusive and predominately andesitic. Lava flows, domes and pyroclastic flows have been generated during its development. On February 18th and April 17th 2007, two phreatic eruptive events were registered. These events were associated with a 4 km high column of ash, formation of a N-S directed 2 km long fissure, change in the pre-existing glacial crack system, an ash fall that covered Pico Central, formation of a new 2-3 km long fissure that cut through the SW and NE slopes of the Pico Central, partial loss of El Oso Glacier (to the east) and the formation of two small lahars which were directed to the Paez and Símbola streams which affected important road infrastructure and left the local populations isolated.

Presently, the morphological changes of glacial mass include gradual melting due to hot gases that emerge from permanent fumaroles along the two big fissures which formed recently, tilting and melting of ice-blocks near the edges of the big fissures and partial loss of some glacial tongue fronts.

Previous studies of glacial retreat looked at the total loss of this glacial mass during the 1960's and 1970's without considering the accelerations due to volcanic eruptions and earthquakes. Therefore, these changes caused by the recent volcanic activity and its subsequent effects are generating a much faster glacial retreat which may lead to a faster retreat of this glacial mass.

Key words

Volcano Nevado del Huila, phreatic eruption, mudflow, fissure, glacier retreat.

Artículo recibido el 24 de octubre de 2008. Aprobado el 30 de diciembre de 2008.

¹ INGEOMINAS, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán. bpulgarin@ingeominas.gov.co; cecardona@ingeominas.gov.co; csantacoloma@ingeominas.gov.co; aagudelo@ingeominas.gov.co; mmonsalve@ingeominas.gov.co

² INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geológicas, Bogotá. mcalvache@ingeominas.gov.co

Introducción

En el mundo, el acelerado retroceso glaciar en las altas montañas, debido al cambio climático, es un fenómeno que no es ajeno al conocimiento actual de las comunidades, principalmente de aquellas que habitan cerca de estas masas glaciares, ya que han sido testigo de los drásticos cambios que se manifiestan en los agrietamientos de los glaciares, su derretimiento parcial, el aislamiento o separación de porciones de hielo de la masa principal, la disminución de la longitud de sus lenguas y la disminución del área, espesor y volumen, hasta llegar a la desaparición de estos. En Colombia también suceden estos fenómenos, y algunos investigadores han realizado estudios en varias zonas glaciadas colombianas (nevados del Ruiz y Santa Isabel, Sierra Nevada de Santa Marta, y los nevados El Cocuy, Tolima y Huila). El panorama del retroceso glaciar en las montañas nevadas, que también son volcanes activos, puede ser un poco más complicado ya que, aparte del cambio climático, la interacción del sistema volcánico (calor interno, emanación de gases calientes, alteración hidrotermal y, en algunos casos, actividad eruptiva con generación de productos sólidos o líquidos calientes como piroclastos y lavas) con las masas de hielo-nieve acelera su afectación y contribuye a mayor desestabilización de estos glaciares. En el Nevado del Huila, de acuerdo con los estudios glaciares previos, realizados por Flórez & Ochoa (1990), Flórez (1992), Pulgarín et ál. (1996 y 2007) y Ariza (2006), el retroceso glaciar ha sido muy acelerado en los últimos años. Después de las erupciones ocurridas en febrero y abril de 2007, su masa glaciar se vio particularmente afectada, lo cual ha acelerado mucho más este retroceso.

Localización y generalidades

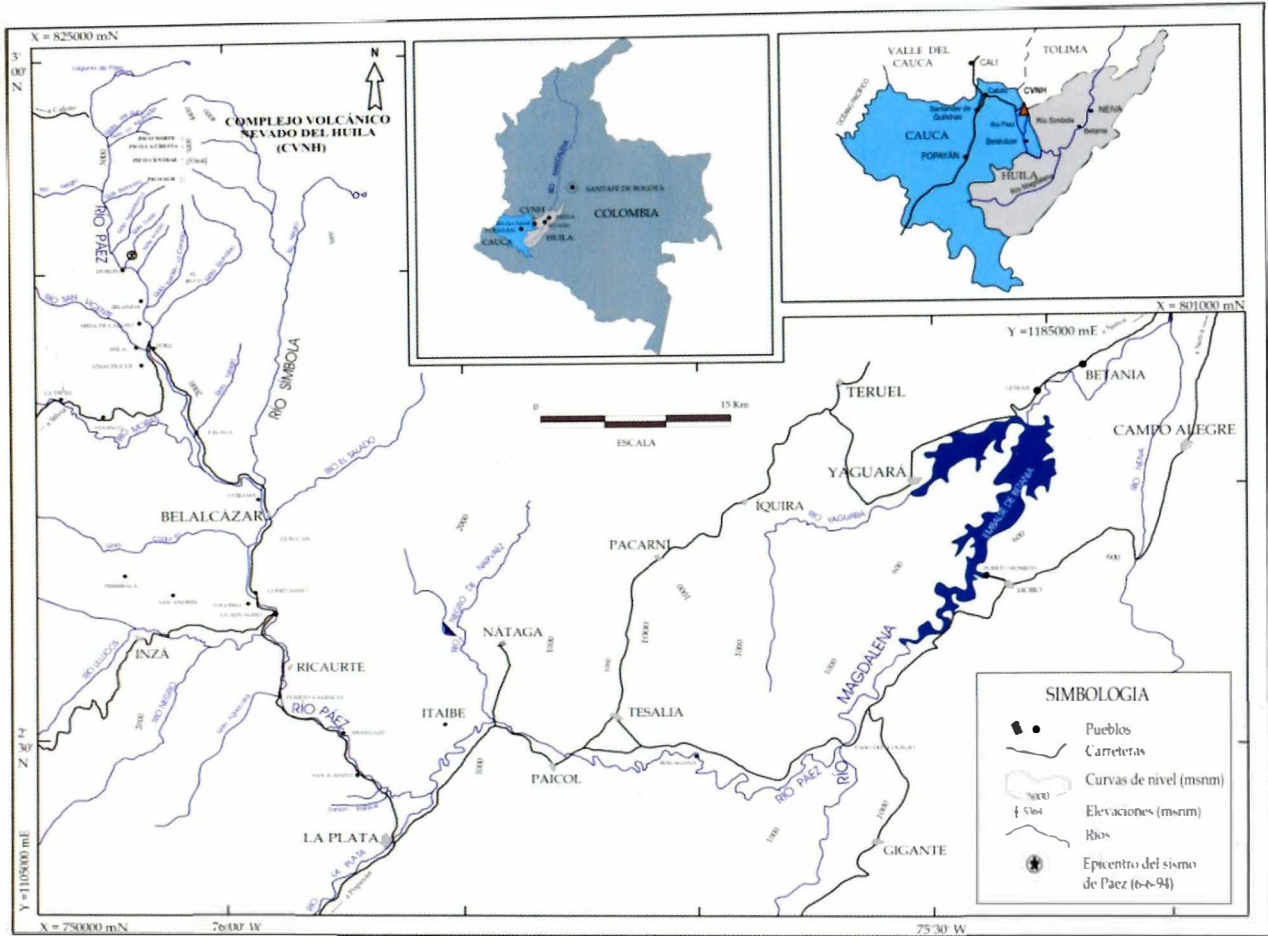
El volcán Nevado del Huila (o complejo volcánico Nevado del Huila), con una altura de 5364 msnm (en 1995, Pulgarín et ál., 1996 y 2007), se ubica en el sector limítrofe entre los departamentos de Cauca, Huila y Tolima (figura 1), sobre la cordillera Central de Colombia, en las coordenadas geográficas 2° 53' de latitud N y 75° 59' de longitud W. Se

encuentra a 85 km al NE de la ciudad de Popayán y 86 km al SE de la ciudad de Cali.

El volcán Nevado del Huila es un estratovolcán de composición mayormente andesítica, con predominio de erupciones de tipo efusivo. En su cima no se aprecian cráteres y en su lugar se encuentran cuatro picos (Norte, La Creta, Central y Sur) que representan antiguos centros de emisión. Además hay presencia de varios domos en la cima del pico Sur. Sobre los picos se encuentra una cubierta glaciar que en 1995 tenía una extensión cercana a los 13,4 km² (Pulgarín et ál., 1996 y 2007). Domos y depósitos de flujos de lava de corta longitud (< 3 km) representan la última evolución de este complejo volcánico, con productos más viscosos y de menor volumen (Correa & Pulgarín, 2002). La única actividad volcánica conocida había estado relacionada con aguas termales y actividad fumarólica, hasta las erupciones ocurridas en 2007. Estas son las primeras erupciones históricas registradas en este volcán.

Estudios glaciares realizados en el Nevado del Huila

Los estudios glaciares realizados en el Nevado del Huila son escasos y han sido apoyados principalmente en estudios fotogramétricos con distintas metodologías, utilizando diferentes tipos de sensores remotos y fotografías aéreas, así como imágenes de satélite. Entre estos trabajos se encuentran: Flórez & Ochoa (1990) y Flórez (1992), con base en fotografías aéreas de 1965, 1981 y 1990, realizan un estudio sobre el retroceso glaciar de este nevado y encuentran que en estos periodos siempre ha habido una tendencia permanente de retroceso (areal y volumétrico). Calcularon que el área en 1850 eran 33,7 km² (basados en el límite de la pequeña Edad Glacial) y que en 1990 eran 13,9 km², lo que muestra una pérdida areal de 19,8 km² en 140 años (promedio de 0,14 km²/año). Además, calcularon los volúmenes para cada uno de estos años. El volumen para 1850 y 1990 era 769,2 y 220,6 millones de metros cúbicos, respectivamente, lo que muestra una pérdida media de 548,6 millones de metros



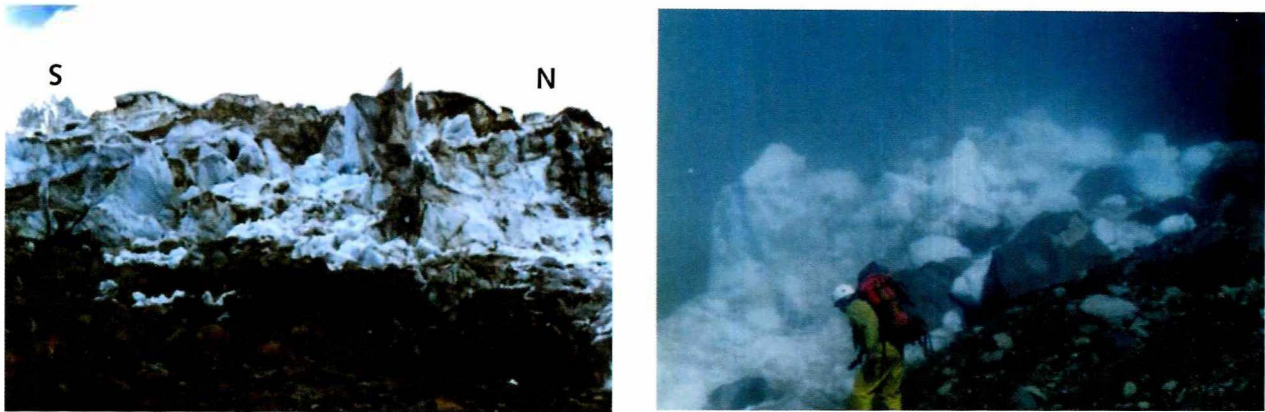
► Figura 1. Mapa de localización del volcán Nevado del Huila.

cúbicos en este periodo (promedio anual de pérdida de 3,91 millones de metros cúbicos), estos datos calculados con espesores medios del glaciar de 23 m y 16 m para 1850 y 1990, respectivamente. La máxima altura la calcularon en 5655 msnm, sobre el pico Central. En su trabajo encuentran una aceleración del retroceso glaciar en la última década analizada (1981 a 1990).

INGEOMINAS (1994) y la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC, 1994) en sus estudios sobre el sismo y avalancha de Páez del 6 de junio de 1994 (magnitud 6,4 Richter), identifican la zona sur del volcán Nevado del Huila como el área epicentral del sismo, cuyo epicentro se localizó a 10 km al SW de la cima volcánica y se originó a 10 km de profundidad. Con este movimiento sísmico, tanto el volcán como el glaciar sufrieron deslizamientos superficiales (se reportaron más de 3000 de ellos en

toda la zona epicentral) que desprendieron más de 320 millones de metros cúbicos de materiales (Calderón et ál., 1997). En el Nevado del Huila hubo algunos frentes de lenguas glaciares que se vieron afectadas por deslizamientos o caída de sus frentes, como el caso del glaciar La Danta (Pulgarín et ál., 1997) en el sector E del pico Norte (figura 2), en el que quedó expuesta, por el desprendimiento, una pared de unos 80 m de alto sobre el glaciar, pero el depósito de bloques de hielo llegó hasta unos 500 m más hacia fuera del límite glaciar. Hubo también algunos desplomes de paredes de roca (lavas) que sostenían glaciares, como en los sectores SW y E del glaciar del Nevado del Huila, en los cuales, los bloques de hielo se encontraban mezclados con los bloques de rocas desprendidos.

Pulgarín et ál. (1996 y 2007), basados en restituciones de la topografía de las áreas glaciares de



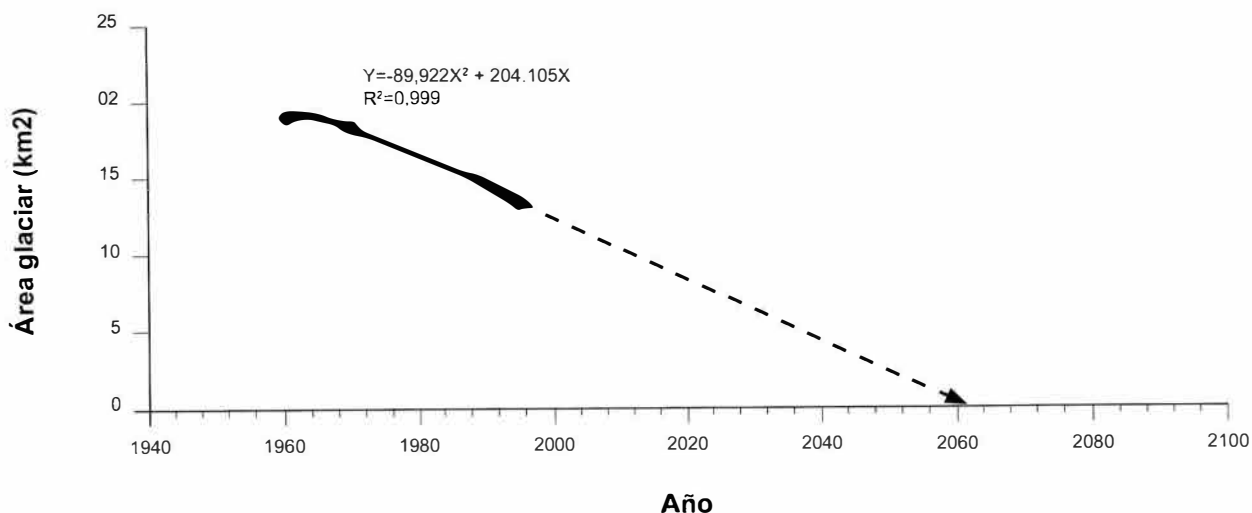
► Figura 2. Fotografías del glaciar La Danta (W del pico N) en julio de 1994, posterior al Sismo de Páez del 6 de Junio de 1994. Izquierda: frente de la lengua, parcialmente colapsado, el espesor de la pared de hielo es de aproximadamente 80 m. Derecha: detalle de los bloques desprendidos del frente de esta lengua glaciar.

este nevado a partir de fotografías aéreas para 1961, 1965, 1970, 1989 y 1995 y el posterior tratamiento de los datos con el Software LISA (Land Information System for All, de origen Alemán), encuentran que entre 1961 y 1995, es decir, un periodo de 34 años, el glaciar perdió $5,47 \text{ km}^2$ (promedio $0,161 \text{ km}^2/\text{año}$), o sea, 29% del área de 1961 y redujo su volumen en $0,27 \text{ km}^3$. La altura de la superficie del glaciar descendió en promedio $14,52 \text{ m}$ (considérese esta como pérdida de espesor), a razón de $0,427 \text{ m/año}$, muy semejante al calculado por Linder (1990) para el Nevado del Ruiz en un periodo muy similar. De esos periodos estudiados, los autores mencionan que el comprendido entre 1989 y 1995 fue el de retroceso más acelerado, al perder $1,33 \text{ km}^2$ en 6 años. En promedio, $0,222 \text{ km}^2/\text{año}$. Además concluyen, mediante extrapolación de sus datos, que el área de glaciar de este nevado se acabaría aproximadamente hacia el 2063, suponiendo que no haya desestabilizaciones súbitas del glaciar causadas por sismos, erupciones volcánicas o grandes deslizamientos. Sobre esta gráfica de tendencia del área glaciar del Nevado del Huila, se realizó una extrapolación a 2007 (sin considerar efectos de la erupción de febrero) y se encontró que este glaciar debería tener un área de unos 11 km^2 (figura 3).

Si se considera el dato de espesor promedio basado en estimaciones visuales presentado por Pulgarín et ál. (1997) para el Nevado del Huila, que

era 55 m , y teniendo en cuenta la pérdida promedio de altura de la superficie glaciar de $0,427 \text{ m/año}$, se podría calcular, de manera general, el volumen de su glaciar, de la siguiente manera: si en 1995 el espesor promedio estimado era 55 m y venía perdiendo entre 1961 y 1995 en promedio $0,427 \text{ m/año}$, entonces hasta el 2007 ha transcurrido un periodo de 12 años, en los que el glaciar habría perdido $5,12 \text{ m}$ de su espesor, es decir, que en 2007 el espesor de este glaciar era aproximadamente $49,88 \text{ m}$. Multiplicando este espesor por el área extrapolada que tenía el glaciar en 2007 (11 km^2), se tiene que el volumen ese año era posiblemente $548.746.000 \text{ m}^3$, que equivalen aproximadamente a $0,55 \text{ km}^3$. Si se tiene en cuenta que el hielo al descongelarse disminuye aproximadamente 9% del volumen y si se considera que el complejo sistema de grietas que contiene el glaciar representa un 10% de los espacios vacíos en el glaciar, se tendría un equivalente de agua de $444.484.260 \text{ m}^3$, o sea, cerca de $0,45 \text{ km}^3$ de disponibilidad de agua para 2007 (antes de las erupciones).

Ceballos et ál. (2007), en un estudio sobre los glaciares en Colombia y su relación con el comportamiento climático, teniendo como caso de estudio el Nevado de Santa Isabel, presentan datos de retroceso, entre otros, del área glaciar del Nevado del Huila entre los periodos 1850 a 1954-1959 y 1954-1959 a 2001-2003, y refiere una pérdida areal



■ **Figura 3.** Tendencia del área glaciar del Nevado del Huila, de acuerdo con Pulgarín et ál. (2007). La extrapolación del área glaciar 2007 es 11 km², aproximadamente.

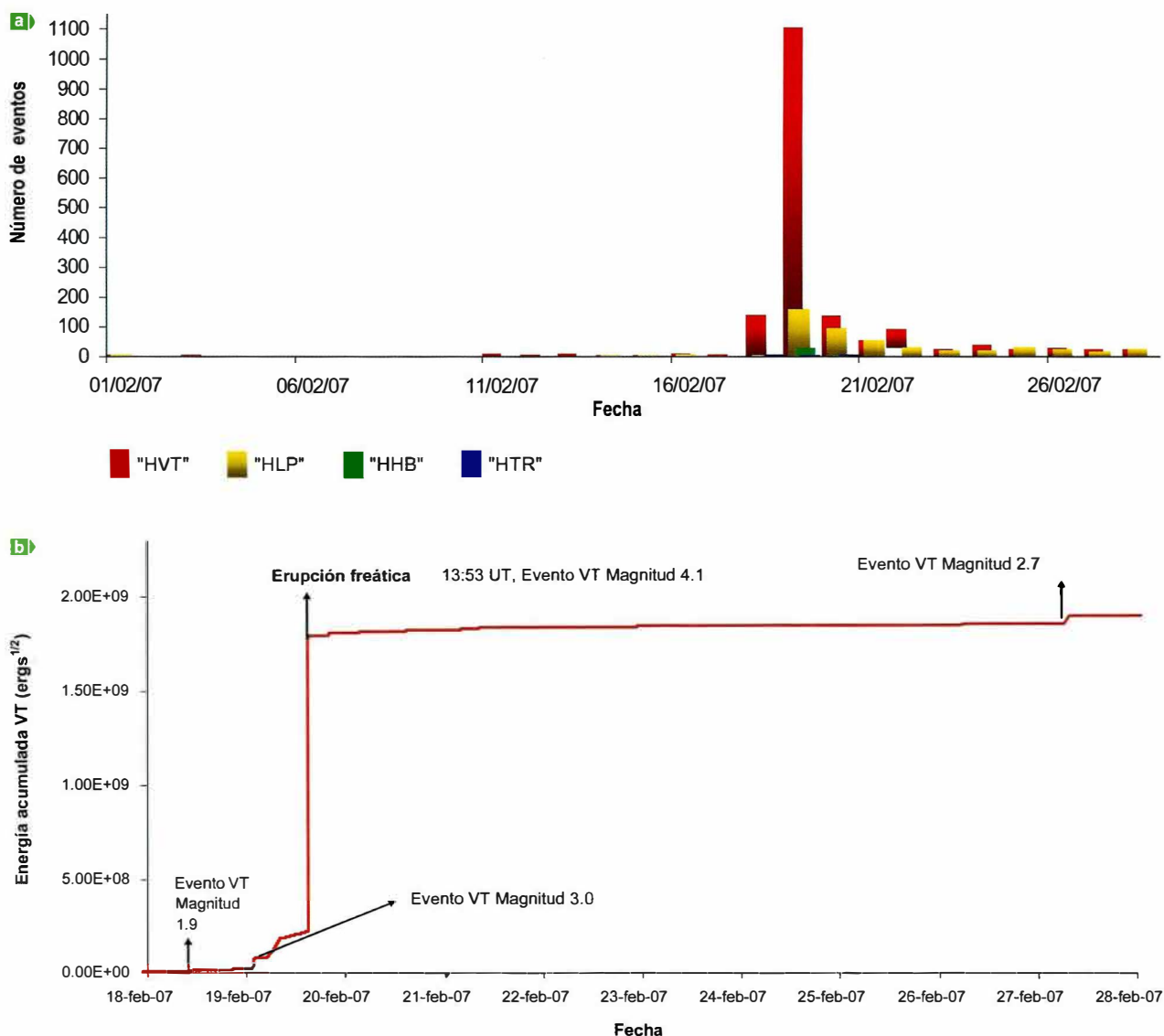
del glaciar de 53% para el primer periodo (de 106 años) y de 25% para el segundo (45 años). Al igual que Flórez (1992), menciona que este glaciar ha presentado la menor pérdida, comparativamente, debido a que gran parte de su masa glaciar se encuentra por encima de la línea de equilibrio.

Ariza (2006), mediante el empleo imágenes Landsat y el NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) aplicado a imágenes de satélite TM y ETM+, calcula, entre otros parámetros, el área glaciar del Nevado del Huila en 1976, 1989 y 2001, y encuentra que para el periodo completo de 1976 a 2001 (25 años) se registró un continuo y constante retroceso de la superficie glaciar, con una pérdida de 5,33 km², lo que constituye una disminución de más de 27% del área en esos 25 años. La altura máxima que encontró para el Nevado del Huila fue 5375 msnm, en las imágenes de satélite de 1976 y 1989, muy similar a la encontrada por Pulgarín et ál. (1996 y 2007), que fue 5364 msnm. Ariza (2006) menciona que para 1976 la superficie glaciar era 19,13 km²; para 1989, esta era 16,55 km²; y en 2001, el área del glaciar se redujo a 13,80 km². De acuerdo con este autor, la mayor parte de la pérdida en la cobertura del glaciar ocurrió entre 1989 y 2001, llegando a presentar un retroceso de 2,74 km² con promedio de 0,228 km²/año (muy similar al presentado por

Pulgarín et ál., 1996 y 2007 para el periodo 1989-1995, que es 0,222 km²/año), mientras que entre 1976 y 1989 redujo su área en 2,58 km², con un promedio de 0,199 km²/año.

Descripción de las erupciones del 19 de febrero y del 18 de abril de 2007

El 18 de febrero, en una estación sismológica localizada al sur del pico Central del volcán Nevado del Huila, se registró un enjambre de 108 eventos sísmicos (muy por encima de lo normal) asociados a fracturamientos de roca, localizados en la parte superficial del edificio volcánico. Posterior a este episodio, el sistema volcánico entró en excitación con generación de sismos de fractura, acompañados con un número creciente de sismos asociados a tránsito de fluidos y gases a través de conductos volcánicos. Toda esta actividad conformó lo que se denominó fase preeruptiva. Luego, el 19 de febrero de 2007, ocurrieron dos sismos principales en la cima del pico Central que marcaron la etapa eruptiva, uno de ellos a las 8:30 a.m., y el otro a las 8:53 a.m., ambos asociados a explosiones fuertes, de acuerdo con los habitantes de las poblaciones relativamente cercanas al volcán. En la figura 4 (tomada de INGEOMINAS, 2007a, 2007b), se aprecia el número de eventos sísmicos y la energía liberada por estos



► **Figura 4.** Gráficas que muestran el comportamiento sísmico. a. Número de eventos sísmicos diarios, asociados con fracturamiento de roca en el volcán Nevado del Huila. b. Energía sísmica diaria liberada durante los procesos eruptivos ocurridos en el volcán Nevado del Huila (tomado de INGEOMINAS, 2007).

durante los procesos eruptivos en 2007. En la erupción del 19 de febrero, se generó una columna de gases, vapor de agua y cenizas que alcanzó 4 km sobre la cima volcánica. A la vez se originó una enorme fisura entre los picos La Cresta y Central, en la parte alta W, la cual tuvo una longitud de 2 km en dirección N-S y unos 80 m de ancho (máximo), a través de la cual emanaban gran cantidad de fumarolas a lo largo de fisura (figura 5).

La ceniza generada, que se calculó de manera aproximada en menos de 700.000 m³, se dispersó

hacia el W. Parte de ella cubrió toda la porción W del glaciar del pico Central y un sector del edificio volcánico. Escasamente alcanzó a llegar ceniza muy fina (polvillo) a poblaciones que se encuentran a 30 km al W del volcán, como Jambaló y Toribío. Con esta erupción también se generó un lahar que descendió por las quebradas La Azufrada (al W) y Bellavista (al SW) hasta llegar al río Páez, con alturas entre 2 y 3 m. La mayoría de su carga de sedimentos fue depositada en los primeros kilómetros del río Páez (el cual tiene una pendiente menor de 1 gra-

do), pues al pasar por la población de Belalcázar (a 48 km de la cima a través de los drenajes), el flujo parecía una crecida normal del río (figura 6) cuya velocidad se calculó en 27 km/h, aproximadamente. Este lahar no causó víctimas fatales, aunque si alcanzó a afectar alguna infraestructura en la parte alta del valle y en cercanías de las orillas.

Después de la erupción de febrero, en el mes de marzo se evidenció una relajación parcial del sistema (o fase poseruptiva), con emisiones pequeñas escasas de cenizas, hasta el 17 de abril, cuando se registró un nuevo incremento en la actividad sísmica (figura 4), con la ocurrencia de otro enjambre de sismos de fractura de rocas, de carácter superficial y localizados también sobre el pico Central, que marcaron la fase preruptiva de esta erupción. Posteriormente, se registró un gran número de sismos asociados a movimiento de fluidos, los cuales desencadenaron finalmente una nueva erupción freática a las 2:57 a.m. del 18 de abril (fase eruptiva). Esta erupción originó una nueva megafisura sobre la cima del glaciar, que tuvo aproximadamente las mismas proporciones de la primera, es decir, 2,3 km de longitud y unos 80 m de ancho, atravesó el pico Central en dirección SW-NE y, a la vez, la fisura

formada el 19 de febrero (figura 7). Hubo generación de escasa ceniza de caída y salida de fumarolas abundantes que brotaban del interior de la fisura y a través de toda su longitud, que no dejaron ver por varios días la verdadera magnitud de la fisura formada, al igual que como ocurrió en la erupción del 19 de febrero. Con esta erupción también se perdió una porción de masa del glaciar El Oso (en el sector E) y hubo formación de un nuevo lahar de volumen mucho mayor que el anterior.

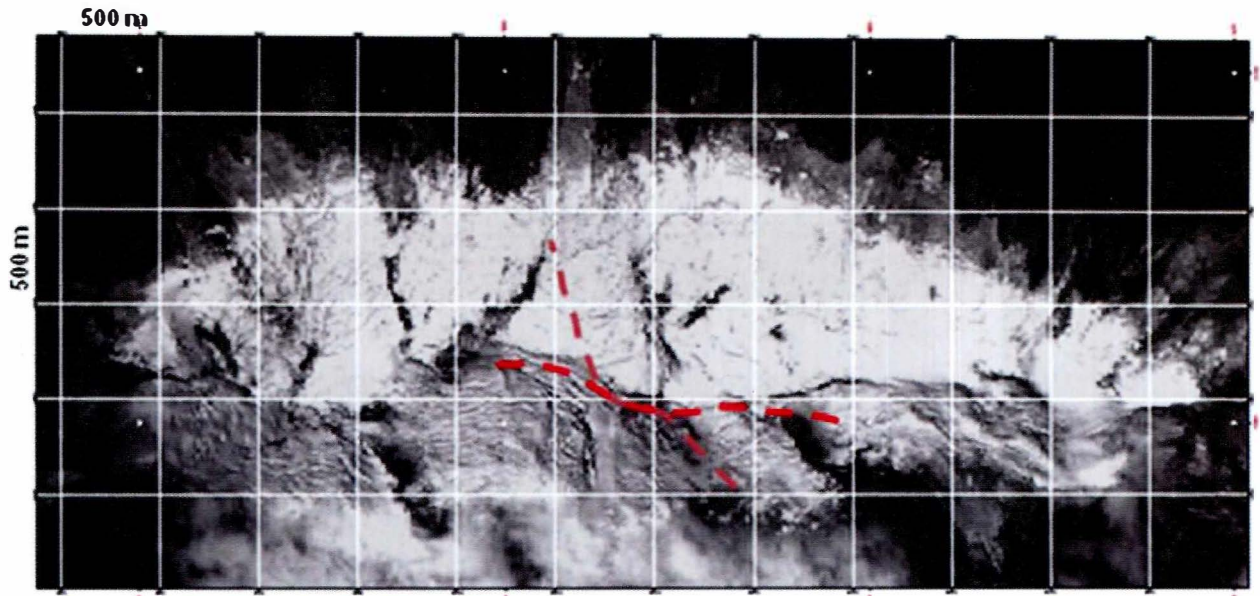
En esta oportunidad, el lahar descendió por los flancos W y E del volcán y luego se encauzó por los ríos Paéz (al W) y Símbola (al E). Ambos ramales del flujo se formaron casi al mismo tiempo y, luego de recorrer distancias muy similares, se encontraron en el sitio de unión de ambos drenajes (figura 8), unos 2 km al N de Belalcázar, y afectaron importante infraestructura vial, dejando incomunicada, entre otras, a esta población, que es el mayor centro poblado del área, y arrasando con varios puentes que se encontraban a alturas entre 5 y 15 m (esta última en los sitios de peralte del flujo). Luego de que los lahares se unieron alcanzaron una velocidad cercana a 80 km/h (en los primeros 50 km), de acuerdo con los datos de los detectores de flujos de



► Figura 5. Fotografía que muestra parcialmente el flanco W del volcán Nevado del Huila. Las fumarolas alineadas indican la formación de una gran fisura en el volcán y, por tanto, en el glaciar. De izquierda (N) a derecha (S): pico Norte y pico La Cresta (protuberancia pequeña antes de la fumarola), Pico Central (con fumarolas y glaciar cubierto por cenizas), y pico Sur (vista parcial del glaciar). En la parte media del pico Central se nota la cicatriz del paso inicial del lahar formado.



► Figura 6. Fotografía de la población de Belalcázar, margen izquierda del río Paéz, tomada el 19 de febrero de 2007 durante el paso del lahar ocurrido en ese día debido a la erupción del volcán Nevado del Huila. Nótese que el lahar parece una crecida normal del río; por tanto, fue poca la afectación sobre sus márgenes a la altura de esta población (compárese con la figura 8).



► **Figura 7.** Imagen QuickBird (febrero de 2007) (USGS). Área glaciar del nevado tomada unos días antes de la erupción de febrero de 2007. En ella están dibujados los trazos de las fisuras grandes formadas con las erupciones del 19 de febrero (rojo oscuro, en dirección N-S) y del 18 de abril de 2007 (en rojo claro, en dirección SW-NE).



► **Figura 8.** Sitio de unión de los dos brazos del lahar generado en la erupción del volcán Nevado del Huila el 18 de abril de 2007. El drenaje de la izquierda es el río Símbola y el de la derecha es el río Páez. El promedio de la altura de la inundación fue 10 m. Nótese la escala de las personas sobre el camino del lado izquierdo de la fotografía. El río corre hacia el S. La fotografía fue tomada desde un puente sobre el río Símbola, que fue arrastrado por el lahar.

lodo instalados en ambas cuencas. También fueron de apoyo, los registros de algunos testigos de las poblaciones de Belalcázar, Tóez y Mesa de Caloto. El lahar tuvo un alto de inundación promedio de 10 m en la parte alta y de unos 5 m en la cuenca baja y en su aproximación al río Magdalena.

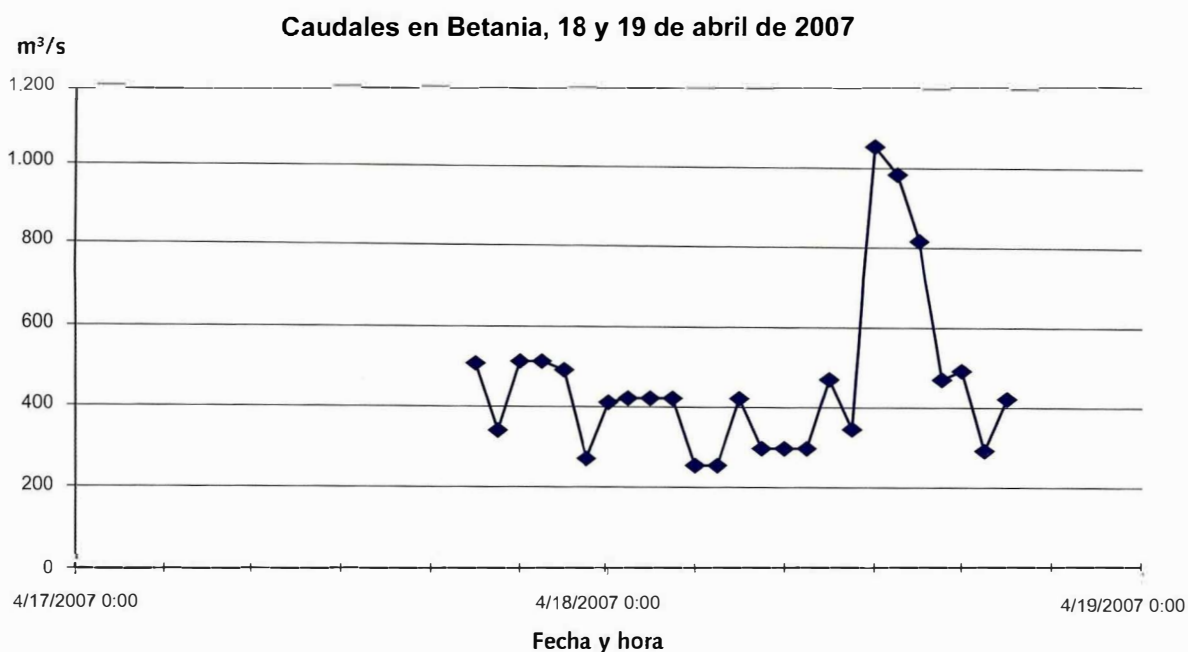
En algunos casos donde los ríos hacían curvas pronunciadas o el valle se estrechaba, las alturas de la inundación alcanzaron entre 16 y 30 m (este último en la cuenca de río Símbola). En total tuvo un recorrido de más de 160 km hasta la represa de Betania (sobre el río Magdalena y en el departamento

del Huila) y un volumen cercano a los 50 millones de metros cúbicos.

La generación de ambos lahares, sobre todo el de abril, no se explica aún de manera satisfactoria, ya que en la represa de Betania (Central Hidroeléctrica de Betania, 2007) se registró la llegada de cerca de 10 millones de m^3 más de lo normal de agua (figura 9), y no hubo aportes de agua de precipitación, ya que no era época de lluvias en la zona. Por tanto, esta gran cantidad de agua debió de haber estado disponible superficialmente de alguna manera en el volcán, ya sea como reservorio superficial, en los ríos, lagunas, grietas o cavidades subglaciares, grietas en las rocas, aguas subterráneas o como reservorios de agua hidrotermal. Además, en la superficie por donde pasaron los flujos no se encontraban cuerpos de aguas importantes, por ejemplo lagunas o lagos, que hubieran aportado estas grandes cantidades de agua, incluso ni sumando el equivalente de agua de los cerca de 500.000 m^3 de hielo perdido del frente de la lengua glaciar El

Oso. En consecuencia, la ocurrencia de ambos lahares fue asociada a la expulsión de volúmenes considerables de agua del interior del volcán a través de las grietas formadas en el momento de las erupciones, las cuales debieron de haber afectado no solo la masa glaciar sino también el edificio volcánico. De acuerdo con las evidencias encontradas en el campo durante la inspección de los depósitos dejados por los lahares y el análisis de las escasas muestras de cenizas de caída colectadas de estas erupciones, no se detectó material juvenil en estos materiales; por ello se considera que ambas erupciones fueron de tipo freático, es decir, debidas a la interacción del calor producido por un cuerpo magmático en ascenso con cuerpos de agua que pudieron haber estado en el interior del glaciar o posiblemente como reservorios de agua hidrotermal, si se considera que en las cenizas analizadas se encontró clorita y tridimita, que son minerales de ambiente hidrotermal.

Posterior a la actividad sísmica registrada el 18 de abril, comenzó una etapa de relajación relativa



■ **Figura 9.** Gráfica de caudal vs tiempo, que muestra el ingreso de cerca de 10 millones de metros cúbicos de agua en exceso a la represa de Betania (localizada a más de 160 km de la cima volcánica), con un incremento notable entre las 12:00 m y 1:00 p.m., es decir, 9 a 10 horas después de la erupción del 18 abril 2007 (Datos: Represa Hidroeléctrica de Betania, 2007).

del sistema volcánico, aunque con esporádicos registros sísmicos importantes, de manera que aunque la actividad decrecía, el nivel de esta quedó más alto que el registrado en el periodo de relajación de la primera erupción. Desde entonces hasta la fecha (agosto de 2008) ha permanecido más o menos constante aunque, como ya se mencionó, ha presentado fluctuaciones temporales con ocurrencia de enjambres de sismos que han alcanzado magnitudes hasta de 3 en la escala de Richter, sobre la cima del pico Central. Algunos fueron asociados a pequeñas emisiones de cenizas.

Imágenes recientes del glaciar del Nevado del Huila

De este glaciar, las imágenes más recientes que se tienen son fotografías tomadas principalmente por personal de INGEOMINAS durante los sobrevuelos en helicópteros de la Fuerza Aérea Colombiana en las rutinas de monitoreo visual llevadas a cabo tanto en las épocas de crisis como en épocas de relativa calma. Con base en estas fotografías se ha realizado la mayoría de las observaciones de los cambios recientes pos eruptivos en el glaciar de este volcán.

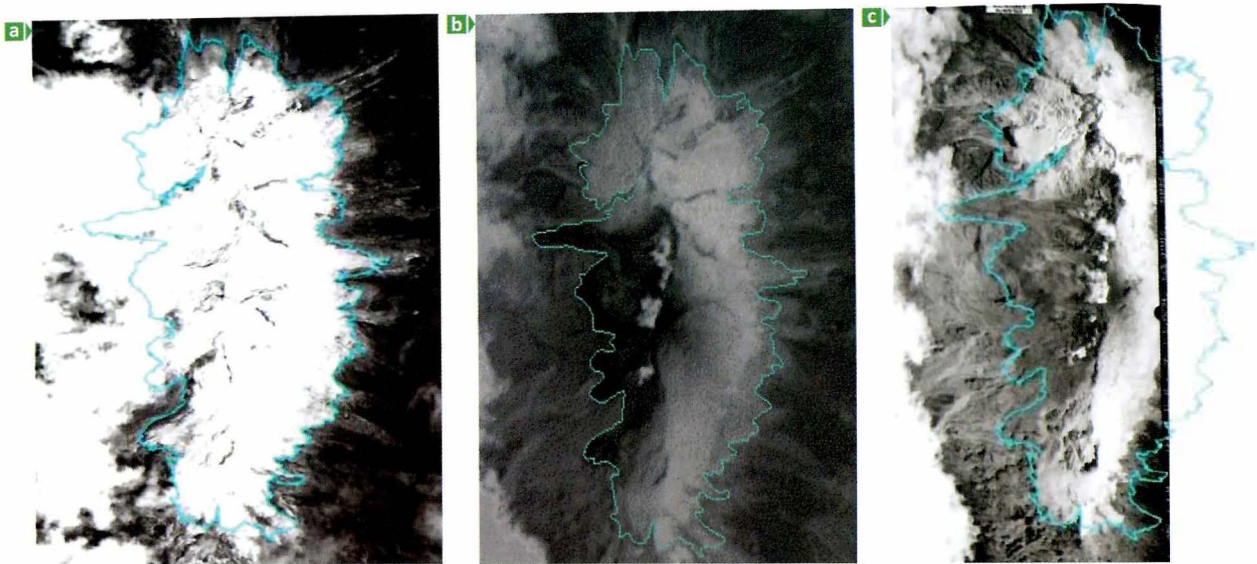
No se han podido realizar cálculos precisos de estas pérdidas de masa glaciar debido a que no se dispone de fotografías aéreas de toma periódica reciente, con posterioridad a las erupciones de febrero y abril de 2007. Los materiales de sensores remotos más recientes de que se dispone son (figura 10):

- Imagen QuickBird (figura 10a) (USGS, 2007a), con 0,6 m de resolución, del 7 de febrero de 2007, unos 12 días antes de la erupción de febrero de 2007. Esta imagen es de muy buena calidad pero el límite W del glaciar quedó oculto por las nubes, de manera que en ella no se puede calcular el área glaciar de manera exacta.
- Imagen ASTER (figura 10b) (USGS, 2007b), de 15 m de resolución, del 23 de febrero de 2007 (4 días después de la erupción de febrero de 2007). De esta imagen se tomó una subescena, emplea-

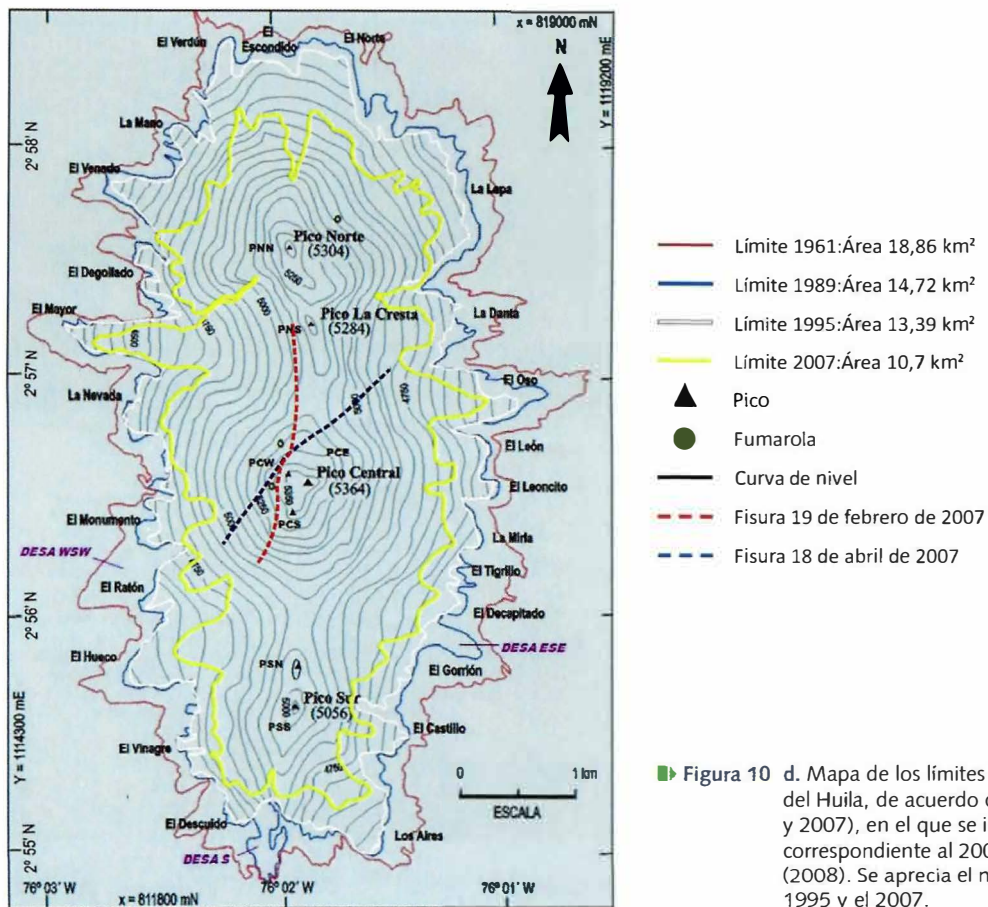
da para compararla con otras dos imágenes disponibles (la QuickBird y la fotografía aérea).

- Línea de vuelo de cinco fotos aéreas (vuelo C-2805 de 2007, fotos 189 a 193), de muy buena resolución (85 micrones), tomadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2007) el 27 de febrero de 2007, es decir, 8 días después de la erupción de ese mes. En la foto 192 de este vuelo se observa el cuerpo casi completo del glaciar; sin embargo, el nevado quedó en un extremo de la fotografía (figura 10c), es decir, en la zona de máxima deformación óptica. Se considera que el límite glaciar del lado W quedó en una zona de la fotografía que puede ser confiable para su medición. Los extremos de las lenguas glaciares del lado E no quedaron completos en esta foto.

Con base en la georreferenciación de la imagen QuickBird, la fotografía aérea del IGAC y la imagen ASTER, se realizó un ajuste (entre las tres) para obtener el límite más preciso del área glaciar, basado principalmente en la imagen QuickBird y corrigiendo los extremos del glaciar tanto del lado W como del E, con las otras dos imágenes. Estos ajustes se realizaron en el software ARC GIS, dando como resultado un área de 10,7 km² (Worni, 2008), muy cercana a los 11 km² de área glaciar calculados a partir de la extrapolación realizada sobre la gráfica de tendencia del área glaciar elaborada por Pulgarín et ál. (1996 y 2007). De esto se infiere que también dicho estudio arrojó resultados confiables, toda vez que la extrapolación hecha fue a los 12 años después del último año tenido en cuenta (1995) como dato real en la gráfica y conociendo que el retroceso glaciar en los últimos años había sido el más acelerado de los periodos estudiados, de acuerdo con los mismos autores. El límite del área glaciar obtenido para el Nevado del Huila en 2007 se encuadró en el mapa de los límites glaciares obtenidos por Pulgarín et ál. (1996 y 2007) (figura 10d). En este se puede visualizar la marcada pérdida areal en los últimos 12 años (1995 a 2007).



► Figura 10. Imágenes de diferentes tipos de sensores remotos del Nevado del Huila, a las que se les dibujó el límite del área glaciar, de acuerdo con la georreferenciación de cada una de ellas y con la complementación de este límite, teniendo en cuenta las tres imágenes, debido a las distintas resoluciones y a la cobertura de nubes. a. Imagen Quick Bird (resolución de 0,6 m) del 7 de febrero de 2007 (USGS, 2007a). b. Imagen ASTER (resolución de 15 m) del 23 de febrero de 2007 (USGS, 2007b). c. Fotografía aérea (resolución 85 micrones) del 27 de febrero de 2007 (IGAC, vuelo C-2805, foto 192) (modificado de Worni, 2008).



► Figura 10 d. Mapa de los límites del área glaciar del Nevado del Huila, de acuerdo con Pulgarín et ál. (1996 y 2007), en el que se incluye el límite glaciar correspondiente al 2007, obtenido por Worni (2008). Se aprecia el notable retroceso areal entre 1995 y el 2007.

Cambios en la masa glaciar del Nevado del Huila ocurridos durante y después de las erupciones de 2007

Entre los cambios manifestados en este glaciar después de las erupciones de 2007, se evidencian notoriamente la formación de las dos megafisuras sobre este glaciar; una en cada erupción. La primera, ocurrida durante la erupción del 19 de febrero (figura 11), se formó entre los picos La Cresta y Central, en dirección N-S, con una longitud de 2 km, un ancho máximo de 80 m y profundidades cuyas paredes internas mostraban alturas mayores de 50 m en algunos sitios.

La segunda megafisura se generó con la erupción del 18 de abril, atravesó el pico Central en dirección SW-NE y cruzó a la vez, la cima de este pico y la fisura formada en la primera erupción (figuras

7 y 12). Tuvo casi las mismas proporciones que la anterior: 2,3 km de largo, 80 m de ancho y profundidades de más de 50 m. Al igual que la primera, también dejaba ver, en algunos sectores de sus paredes, los estratos de cenizas de anteriores erupciones, intercalados en el hielo. En ambas erupciones se observó la formación de canales delgados de derretimiento superficial del glaciar (figura 13), principalmente en la parte alta del glaciar mayor, al W del pico Central, que indican la salida de flujos calientes del interior del volcán, a través de las fisuras formadas. Seguramente, fueron canales por donde se encausaron inicialmente los lahares generados.

La actividad fumarólica durante las erupciones fue tan abundante en las dos megafisuras (figura 14) que mantuvo oculta la verdadera magnitud de estas hasta algunos días después de su formación,

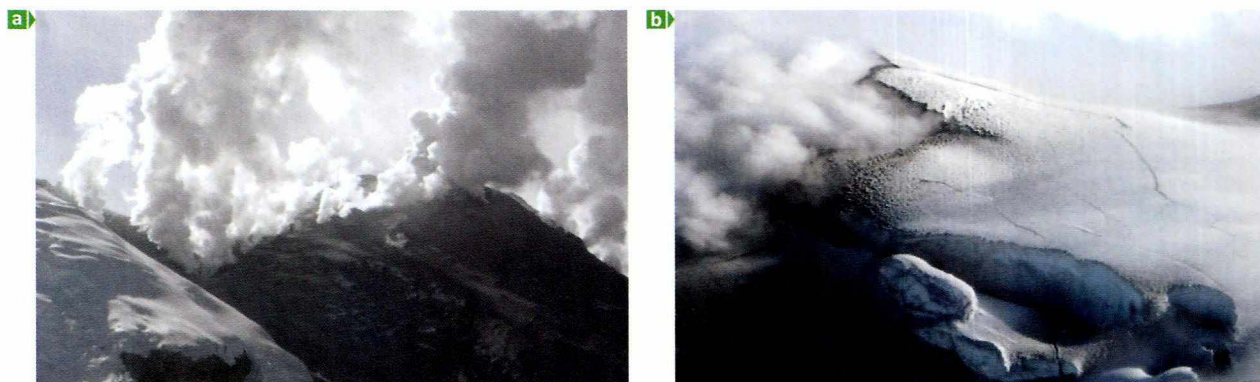


Figura 11. Fisura formada durante la erupción del 19 de febrero de 2007 sobre la parte alta W del glaciar del Nevado del Huila. a. Fumarolas alineadas en dirección N-S que indican la presencia de la fisura. b. Parte alta de la fisura, sobre la cima del pico Central. Dentro de la fisura, las paredes pueden alcanzar unos 50 m de altura.

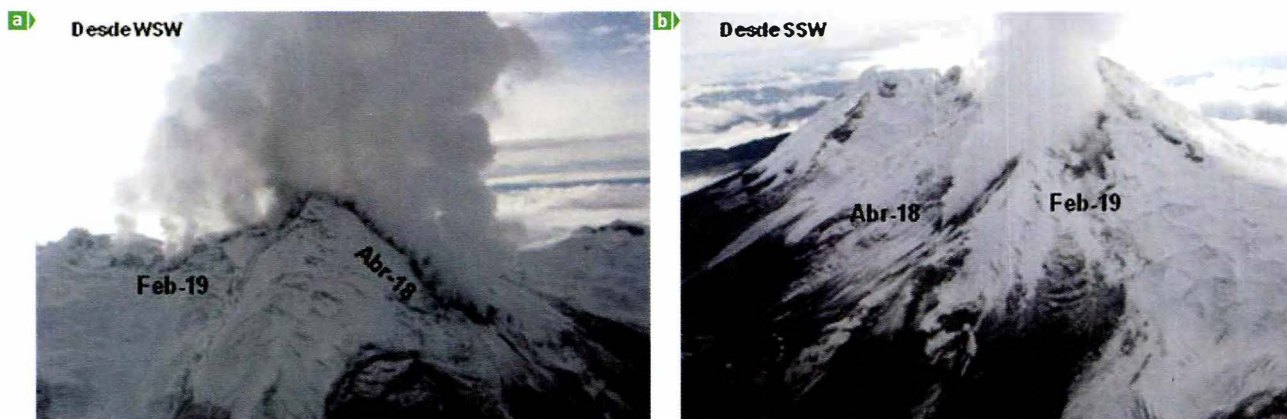
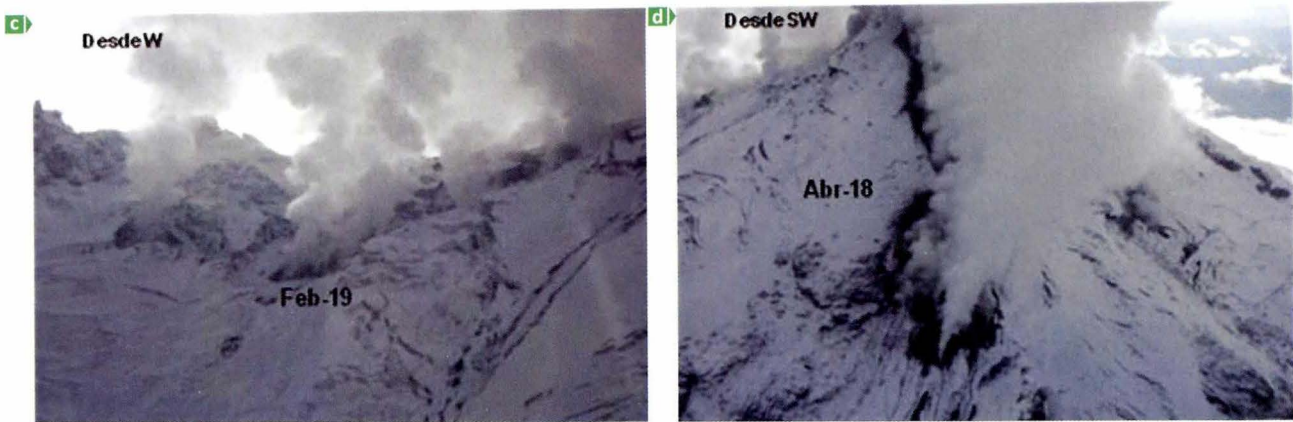
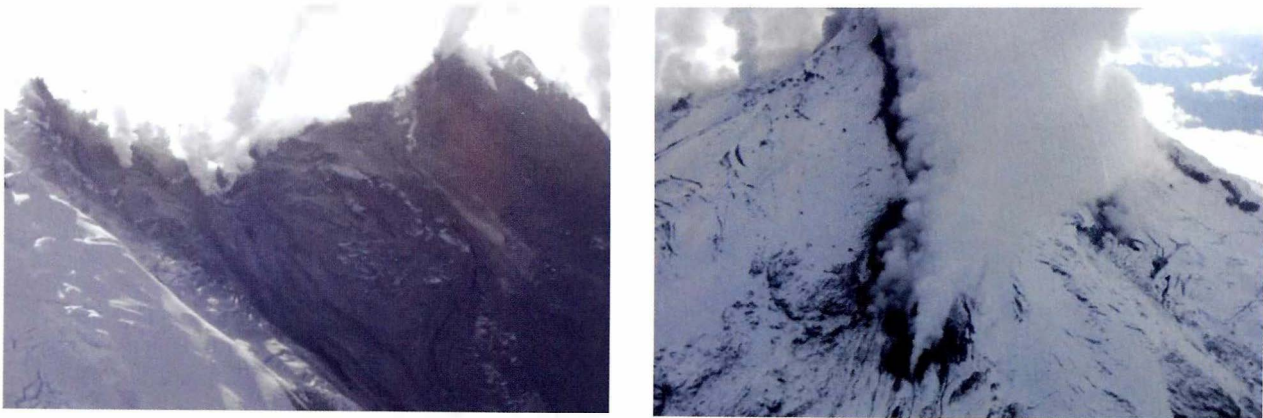


Figura 12. Fotografías de fisuras formadas en las erupciones del 19 de febrero y del 18 de abril de 2007 (tomadas el 22 de abril). a y b muestran el cruce de ambas fisuras, desde dos puntos diferentes.



► Figura 12. c. Fisura del 19 de febrero, aún con abundante actividad fumarólica. d. Porción SW de la fisura del 18 de abril, mostrando abundante salida de fumarolas y con las orillas cubiertas de ceniza.



► Figura 13. Canales de fusión en el hielo, que denotan el inicio de los lahares, debido a la salida de agua caliente de las fisuras. Izquierda: canales formados en la erupción del 19 de febrero de 2007, entre los picos La Cresta y Central. Derecha: canales en el frente del extremo SW de la fisura formada en la erupción del 18 de abril.



► Figura 14. Actividad fumarólica abundante a través de las fisuras formadas durante las erupciones del 19 de febrero y 18 de abril de 2007, la cual se mantuvo por varias semanas, ocultaba parcialmente la magnitud de las fisuras y generaba derretimiento de las paredes del glaciar. En ambas fotos se observa la cobertura de ceniza sobre el flanco W del glaciar del pico Central.

cuando habían disminuido parcialmente su actividad. Este fenómeno, que debió y debe continuar produciendo actualmente un derretimiento lento pero continuo de las paredes de la fisura, dio inicio a una serie de basculamientos de bloques grandes de hielo hacia adentro de las fisuras (figura 15), los cuales se derretían. Las aguas producidas comenzaron a arrastrar cenizas depositadas sobre el hielo, buscaron salida y formaron pequeños lahares locales en la zona periglacial.

Con la erupción del 18 de abril de 2007 también se produjo la pérdida parcial del frente de la lengua glaciar El Oso (figura 16), que hasta entonces había sido el glaciar de mayor longitud del lado E del Ne-

vado del Huila. Al parecer el glaciar no se derritió desde arriba (no tenía indicios de depositación de sedimentos sobre él) sino desde abajo, como si una masa de agua caliente hubiera pasado por debajo de éste, derretiéndolo y haciéndolo subsidir luego, ya que sobre la superficie periglacial quedaron regados algunos fragmentos del glaciar y, en seguida de ellos, la huella del lahar que descendió por este valle. Mediante estimaciones preliminares, se obtuvo un volumen perdido de masa glaciar para este frente de lengua de aproximadamente 500.000 m³.

En ambas erupciones se evidencia la formación de nuevas grietas diferentes de aquellas que normalmente mostraba el glaciar debido a la acción de



► Figura 15. Fotografías en las que se observa el basculamiento de bloques de hielo hacia la parte interna de las fisuras. Fotos tomadas el 22 de abril de 2007. Izquierda: porción NE alta de la fisura del 18 de abril. Derecha: Porción N alta de la fisura del 19 de febrero.



► Figura 16. Fotografías del sector E del glaciar del Nevado del Huila, donde se aprecia la pérdida parcial del frente de la lengua glaciar El Oso (en el centro de las fotos). Izquierda: tomada el 11 de abril de 2007 (siete días antes de la erupción del 18 de abril). Derecha: tomada el 22 de abril. Se observan la forma diferente del frente de la lengua, que indica la pérdida parcial de masa glaciar, la fisura formada en la erupción del 18 de abril y la evidencia del paso de lahar a partir de esta lengua glaciar.

la gravedad (favorecidas debido a la posición del glaciar en altas pendientes). Estas nuevas grietas se reconocían porque se encontraban más limpias de cenizas y, en algunos casos, más abiertas que las anteriormente formadas. En las paredes, se alcanzaban a distinguir las grietas desde los sobrevuelos en helicóptero, y diferentes niveles de capas de cenizas intercaladas entre el hielo, seguramente producto de erupciones anteriores no vistas o no reportadas por el hombre. Hubo formación de grietas paralelas o no a las existentes. En ocasiones, se observaron patrones rectos paralelos al eje mayor del glaciar (figura 17), principalmente en el flanco E.

La desestabilización general evidenciada por la presencia y conexión de todos los sistemas de grietas (antiguas y nuevas), principalmente en la parte alta del glaciar donde la pendiente es mayor, comenzó a hacerse más notoria y empezaron a formarse especies de escalones de hielo cubiertos por cenizas. Algunas de estas grietas se tornaron en cavidades casi redondas (figura 18) y con subsidencia y escalonamiento de bloques, quizá debido al mismo derretimiento que seguramente se presentaba en el contacto entre la roca y la base del glaciar, así como por la salida, unas veces continua y otras intermitente, de fumarolas a través de ellas.



► **Figura 17.** Fotografías del flanco E del glaciar del Nevado del Huila. Izquierda: se observa, en su parte media, la formación patrón de grietas rectas paralelas al eje mayor del glaciar. Derecha: se observa también el patrón de grietas longitudinales y se evidencia la generación de avalanchas angostas de nieve de pequeña magnitud, que no sobrepasan el límite del glaciar.



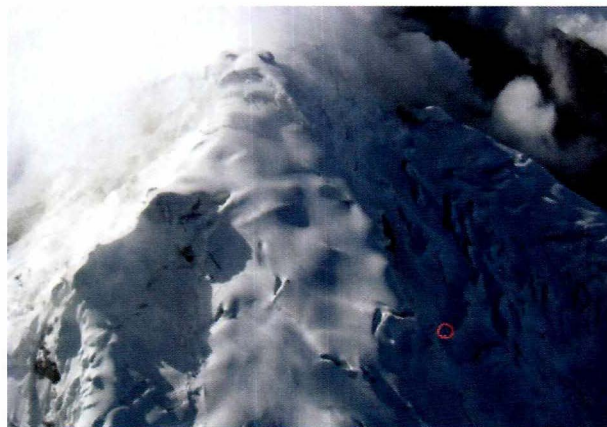
► **Figura 18.** Fotografías de las fisuras. Izquierda: se aprecian algunos hoyos en el glaciar, a partir de los cuales ha evolucionado la apertura en la fisura formada el 19 de febrero de 2007 (parte S de la fisura). Tomada el 22 de abril de 2007. Derecha: fotografía de la fisura al NE, tomada el 12 de mayo de 2008. Nótese los basculamientos, el escalonamiento de bloques de hielo y la escasa actividad fumarólica.

Durante las erupciones y en los días posteriores a ellas hubo otras emanaciones pequeñas de cenizas que cubrían principalmente la parte alta del pico Central y su flanco W, aunque en ocasiones también se cubrió su parte E. En general, estas caídas de ceniza no han afectado drásticamente los picos Norte, La Cresta y Sur. Entre las épocas en las que no se presentaban emisiones de cenizas, también ha habido condiciones climáticas que han favorecido la formación de capas de nieve nueva sobre las cenizas depositadas, produciéndose una recuperación parcial de la masa glaciar (figura 19). En ocasiones alcanzaba a cubrir por completo las cenizas depositadas sobre el glaciar y algunas de las grietas de poca profundidad quedaban nuevamente rellenas y comenzaban a formar nuevamente neveros, que dejaban casi completamente cubierta la grieta.

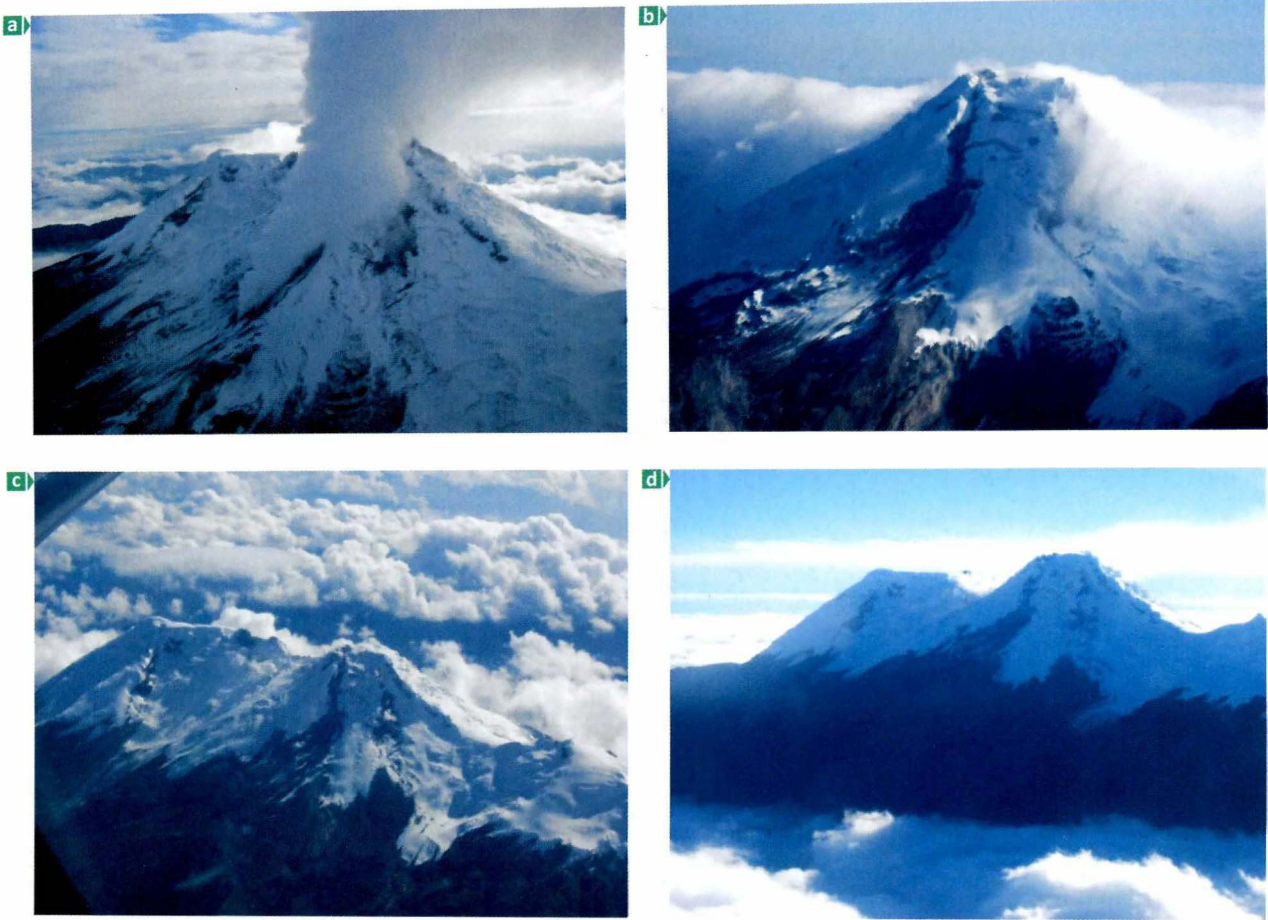
Desde los sobrevuelos era preocupante observar el panorama del glaciar ya que se veía muy desestabilizado por la presencia de las megafisuras, las grietas, los escalones y los hundimientos formados. Se pensaba en la posible ocurrencia de una avalancha de hielo, además de la desestabilización del flanco W del volcán; aunque estos escenarios todavía no pueden descartarse, el comportamiento que ha continuado mostrando esta parte del glaciar no

sugiere, en el tiempo cercano, la formación de una avalancha de grandes proporciones, a no ser que ocurran mayores desestabilizaciones causadas por nuevas erupciones. En contraste, lo que ha sucedido es un derretimiento parcial de los glaciares cercanos a los extremos de las dos megafisuras (figura 20), localizados en las partes S y SW y en la parte E del glaciar. Como estos extremos quedaron cerca al límite glaciar, lo observado sugiere que las aguas calientes que descienden por dentro de ambas fisuras han causado el derretimiento del hielo entre el final de cada megafisura y el límite glaciar, provocando la entrada de dicho límite cada vez más hacia las fisuras, generando un retroceso más acelerado que el provocado por el cambio climático.

También han ocurrido pequeños desprendimientos de hielo y nieve de las paredes más altas del glaciar, principalmente observables en el sector E y N (figuras 20b y 21b), donde se han apreciado acumulaciones alargadas de bloques de hielo y de nieve, que terminan en forma de pequeños abanicos. En general, han quedado depositadas sobre la misma masa glaciar o, en algunos casos, han alcanzado a sobrepasar ligeramente la línea del límite glaciar, como se pudo observar en la parte SE del pico Central, en una fotografía del 29 de abril de 2008,



► Figura 19. Fotografías que muestran la acumulación de nuevas capas de nieve. Izquierda: parte W del Pico Central, tomada el 4 de abril de 2008, donde se observa la nueva cobertura de nieve sobre las cenizas que cubrían este sector del glaciar. A las partes media y baja de la lengua glaciar Mayor, aún se les nota parte de la cubierta de cenizas. Derecha: flanco NW del pico N, donde se aprecia el relleno de grietas por la nueva acumulación de nieve y una línea de avalancha de nieve. Tomada el 1 de marzo de 2007.



► **Figura 20.** Fotografías de los extremos sur de las dos fisuras formadas en 2007. a. Tomada el 22 de abril de 2007, donde se observa una actividad fumarólica fuerte en ambas fisuras. b. Tomada el 20 de noviembre de 2007, con muy escasa actividad fumarólica. c. Tomada el 27 de marzo del 2008, también con escasa actividad fumarólica. d. El mismo sector, 6 de mayo de 2008; se aprecia muy poca actividad fumarólica. Al comparar estas fotografías se evidencia la pérdida de masa glaciar tanto en las márgenes como en los extremos de las fisuras.



► **Figura 21.** Fotografías del flanco E del volcán Nevado del Huila, tomadas desde el SE. Izquierda: tomada el 11 de abril de 2007, donde aún no se aprecia el depósito de bloques de hielo. Derecha: tomada el 29 de abril de 2008, en la que se aprecia un depósito de bloques de hielo que sobrepasó aproximadamente 1,2 km la línea del límite glaciar, lo que indica la desestabilización por todos los efectos que ha sufrido el glaciar. Sector SE del pico Central.

en la que se observa una pequeña avalancha de bloques de hielo, más de un año después de la segunda erupción (ocurrida en el mes de abril de 2007) y seguramente debido a la inestabilidad generada por la abundancia de grietas y el derretimiento lento del glaciar por la salida de gases calientes. El depósito llegó hasta aproximadamente 1,2 km más abajo del límite glaciar (figura 21).

Conclusiones

- Las erupciones ocurridas en 2007 en el volcán Nevado del Huila son las primeras erupciones históricas registradas.
- Las megafisuras de la cima del volcán Nevado del Huila (erupciones de 2007) fueron causadas por la desestabilización (apertura-limpieza de conductos volcánicos) y la interacción presión-calor de un magma ascendente en el que no se registró salida de material juvenil y por eso se han clasificado como erupciones freáticas.
- De acuerdo con el registro geológico, los escenarios eruptivos posibles podrían ser flujos de lava (fisurales) o domos y generación de nuevos lahares.
- Aunque en las erupciones hubo fases preeruptivas cortas, el Observatorio Vulcanológico pudo dar aviso oportuno a las autoridades y comunidades, de manera que más de 5000 personas alcanzaron a evacuar exitosamente en cerca de 5 horas antes del paso de los flujos. Esto indica el trabajo mancomunado y el funcionamiento de los comités de emergencia, la disponibilidad y preparación de la comunidad y los organismos de protección civil.
- La experiencia que han acumulado los sismólogos en nuestro medio es digna de reconocimiento, pues gracias a ella se pudo dar el aviso oportuno de la ocurrencia de la erupción y de los flujos de lodo.
- Hubo un exceso de agua en la erupción/lahar de abril (7,5 millones de metros cúbicos) si se tienen en cuenta los 10 millones de metros cúbicos de exceso de agua que ingresó en la represa de Betania el día de la segunda erupción (18 de abril de 2007). Su origen debió estar relacionado con cuerpos de agua presentes en grietas glaciares, lentes subglaciares, fracturas superficiales en las rocas, acuíferos superficiales en materiales fragmentarios, aguas en reservorios hidrotermales.
- Los trabajos de Pulgarín et ál. (1996 y 2007) y Ariza (2006) muestran características similares de retroceso glaciar para este nevado, es decir, aceleración en el último periodo analizado, que para los primeros autores va de 1989 a 1995, con promedio anual de pérdida de área glaciar de 0,222 km²/año, y para el segundo, va de 1989 a 2001, con un promedio de 0,228 km²/año.
- Debido a la escasa disponibilidad de imágenes remotas de precisión para estudios multitemporales, no se dispone de medidas cuantitativas exactas de los cambios glaciares ocurridos después de las erupciones de 2007; sin embargo, en los sobrevuelos de inspección se ha visto que el cambio en la dinámica del glaciar ha sido bastante notoria y se han observado cambios importantes, como escalonamiento, basculamiento y colapsamiento de grandes porciones del glaciar desde las márgenes de las megafisuras hacia adentro de éstas, además fusión del glaciar posiblemente desde el piso de éste, en las zonas de las fisuras y en los frentes de las partes finales de estas fisuras, así como en algunos frentes de lenguas glaciares y la formación de nuevas grietas en la masa glaciar; todo lo cual está causando una gran desestabilización y está contribuyendo con el aceleramiento del retroceso glaciar de una manera marcada, que muy seguramente llevará a la extinción más rápida de lo previsto, de esta masa glaciar.
- Se deberán emprender nuevos estudios multitemporales mediante sensores remotos para investigar la dinámica y el retroceso de este glaciar antes de que sea demasiado tarde, lo que dependerá de la disponibilidad de estas herramientas y su respectivo análisis. ▀

Referencias Bibliográficas

- Ariza, A. (2006). Retroceso de glaciales tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. By laws of the Journal Editorial Board Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico. Accepted march 2006. Madrid: Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía.
- Calderón, Y., Ávila, G. & Ojeda, J. (1997). Estudio de amenazas y zonificación geológica de la cuenca del río Páez. 2nd Pan-am. Symp. Landslides, 2nd COBRAE. Río de Janeiro.
- Ceballos, J. L., Euscátegui, C. & Tobón, E. (2007). *Los glaciares en Colombia, su estudio y relación con el comportamiento climático, caso volcán Nevado Santa Isabel (Cordillera Central, Colombia)*. Memorias de la Primera conferencia internacional de cambio climático: impacto en los sistemas de alta montaña. Bogotá: IDEAM-Universidad de Zurich, pp. 75-85.
- Central Hidroeléctrica de Betania (CHB). (2007). Datos de caudales de entrada a la represa de Betania los días 6 de junio de 1994, 18 y 19 de febrero de 2007, y 17 y 18 de abril de 2007 (comunicación escrita).
- Correa, A. & Pulgarín, B. (2002). Morfología, estratigrafía y petrografía general del complejo volcánico Nevado del Huila (énfasis en el flanco occidental). Informe Interno. Popayán: INGEOMINAS.
- Flórez, A. (1992). Los nevados de Colombia, glaciales y glaciaciones. *Revista Análisis Geográficos*, 22, 95. Bogotá: IGAC.
- Flórez, A. & Ochoa, F. (1990). El Nevado del Huila o Ñandí. *Revista Colombia, sus Gentes y Regiones*, 20, 206-215. Bogotá: IGAC.
- IGAC. (2007). Vuelo C-2805 de 2007, fotos 189 a 193, 85 micrones de resolución, del 27 de febrero de 2007.
- Ingeominas. (1994). El sismo de Páez, Cauca, del 6 de junio de 1994, evaluación de emergencia. Informe presentado al Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia. Santafé de Bogotá: INGEOMINAS.
- Ingeominas. (2007a). Informe de actividad sísmica febrero de 2007. Popayán: INGEOMINAS.
- Ingeominas. (2007b). Informe de actividad sísmica abril de 2007. Popayán: INGEOMINAS.
- Linder, W. (1993). Pérdidas en la masa de hielo en el Nevado del Ruiz, causadas por procesos climáticos y eruptivos durante los últimos 50 años. *Revista Análisis Geográficos*, 23, 113. Santafé de Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Pulgarín, B., Cepeda, H. & Correa, A. (1997). Geología del complejo volcánico Nevado del Huila. Informe Interno. Popayán: INGEOMINAS.
- Pulgarín, B., Jordan, E. & Linder, W. (1996). Cambio glaciar del volcán Nevado del Huila entre 1961 y 1995. *Memorias*. VII Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.
- Pulgarín, B., Jordan, E. & Linder, W. (2007). Aspectos geológicos y cambio glaciar del volcán Nevado del Huila entre 1961 y 1995. *Memorias*. Primera conferencia internacional de cambio climático: impacto en los sistemas de alta montaña. Bogotá: IDEAM-Universidad de Zurich, pp.123-140.
- Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC). (1994). El sismo de Páez (Cauca) del 6 de Junio de 1994. *Boletín Mensual de Sismos*, 2(13), 6, Santafé de Bogotá: INGEOMINAS,
- USGS. (2007a) Imagen QuickBird, 0,6 m de resolución, del 7 de febrero de 2007. *US Geological Survey*.
- USGS. (2007b). Imagen ASTER, 15 m de resolución, del 23 de febrero de 2007. *US Geological Survey*.
- Worni, R. (2008). *Volcanic eruption-related impacts on glaciers and modelling of lahars at Nevado del Huila, Colombia*. Diploma Thesis. Department of Environmental Sciences ETH Zurich. Authored at the University Zurich and INGEOMINAS. Popayán and Bogotá, Colombia.

