

# GLACIARES COLOMBIANOS: EVOLUCIÓN RECIENTE Y ESTADO ACTUAL

Ceballos, J. <sup>1</sup>; Tobón E. <sup>2</sup>.

## RESUMEN

Las montañas nevadas colombianas, han experimentado durante el Holoceno, importantes avances y retrocesos en su masa glaciar como respuesta fundamental a cambios climáticos. A partir de análisis con sensores remotos (fotografías aéreas e imágenes de satélite) se ha podido reconstruir la evolución de área desde el Neoglacial para los seis masas glaciares actuales del país, teniendo una extensión para el periodo 2002 – 2003 de 55 km<sup>2</sup>, lo cual representa una disminución cercana al 80% durante los últimos 150 años. Actualmente la pérdida de área se estima entre el 1 y 3% anual. En cuanto a la pérdida de espesor de hielo se ha observado en un periodo de 10 meses un promedio de tres metros aproximadamente en el volcán nevado Santa Isabel (Cordillera Central). Estos datos anuncian la inevitable desaparición del hielo en la alta montaña colombiana en tan solo algunas décadas.

**Palabras clave:** Glaciar, ablación, balance de masa, retroceso glaciar.

## GLACIERS IN COLOMBIA: RECENT EVOLUTION AND PRESENT CONDITION

### ABSTRACT

The snow-covered mountains Colombian, have experimented during the Holoceno, important advances and backward movements in their mass glacier like fundamental answer to climatic changes. From analysis with remote sensors (aerial photographs and satellite images) it has been possible to reconstruct the evolution of area from Neoglacial for the six masses present glaciers of the country, being had an extension for period 2002 - 2003 of 55 km<sup>2</sup>, which represents a diminution near 80% during last the 150 years. At the moment the lost one of area is considered between 1 and annual 3%. As far as the loss of thickness of ice to observed in a period of 10 months an average of three meters approximately in the snow-covered volcano Santa Isabel (Central mountain range). These data announce the inevitable disappearance of the ice in the high Colombian mountain in only some decades.

**Key words:** Glacier, ablation, balance of mass, backward movement glacier.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos básicos del IDEAM es el de promover, coordinar y realizar estudios e investigaciones básicas para generar, producir y divulgar información y conocimiento sobre el estado de los ecosistemas del país. Dentro de esta misión se enmarcan los glaciares como un recurso natural que debe ser estudiado y monitoreado, para proporcionarle al país la información necesaria sobre su comportamiento y evolución.

La alta montaña, en especial los nevados o glaciares, son considerados como uno de los ecosistemas más sensibles a los cambios climáticos y las evidencias muestran un rápido retroceso e incluso extinción de nevados durante el último siglo. Por estas razones, es importante, realizar estudios que permitan conocer su dinámica y comportamiento ante diferentes variables climáticas. Desde hace más de una década se realizan mediciones detalladas en campo en el volcán nevado

---

<sup>1 y 2</sup> Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-  
jorgec@ideam.gov.co, edutobon@hotmail.com

Santa Isabel y en la sierra nevada de El Cocuy, Chita o Güicán, (IDEAM 2001, 2004, 2005) donde se han instrumentado algunos de sus glaciares con el objetivo de relacionar su dinámica con el clima y determinar los posibles impactos por su extinción. Periódicamente (cada 3 a 5 años) se actualiza el área glaciaria (Tobón, 2004) se llevan a cabo campañas para calcular volúmenes de agua.

## ANTECEDENTES

La investigación estrictamente glaciológica en el país fue iniciada por el IGAC a partir de la década del 80. Allí se establecieron las bases para el monitoreo de la dinámica glaciaria en Colombia y se reconstruyó la evolución del área glaciaria desde el final del Neoglacial (año 1850 aprox.). Posteriormente el IDEAM asumió dicha responsabilidad con el mejoramiento de las redes de observación, medición de áreas y espesores con nuevas tecnologías entre ellas el cálculo de un balance de masa glaciológica.

## MARCO GEOLÓGICO

Actualmente se tienen dos glaciares piloto en estudio: sierra nevada de El Cocuy, Chita o Güicán (Cordillera Oriental) y volcán nevado Santa Isabel (Cordillera Central), ambos sobre estructuras geológicas diferentes siendo este un criterio importante para su elección.

Las rocas del sustrato sobre las que están dispuestos los glaciares de la sierra nevada de El Cocuy son principalmente areniscas, depositadas en ambientes marinos y litorales en una cuenca de hundimiento durante el Cretáceo. Las capas fueron deformadas por plegamientos y rupturas durante la fase de compresión del Mioceno Superior, cuando la subsidencia de la cuenca fue interrumpida y la Cordillera Oriental empezó a emerger (Favre 1983 en IGAC 1992). Las capas sedimentarias buzan hacia el occidente, siendo consecuentes con la pendiente, mientras que al oriente afloran las capas cortadas y con inclinación opuesta a la pendiente del terreno por lo que se forman cornisas abruptas. De ahí que el hielo está acumulado principalmente en los flancos occidentales, pero en el pasado el espesor y cantidad de hielo eran mucho más importantes y las disimetrías del relieve no influían tan

preponderantemente como ahora en la distribución de glaciares. Así, en el pasado el hielo descendía más por el oriente o lado más húmedo, mientras que hoy desciende más con exposición hacia el valle del Chicamocha, contradictoriamente con unas condiciones más secas.

El nevado Santa Isabel hace parte del complejo volcánico Ruiz – Tolima el cual ha sido definido como un macizo ígneo-metamórfico en el centro de la Cordillera Central, modelado por depósitos volcánicos Plio-Pleistocénicos. Es catalogado como un estrato volcán, con características tanto efusivas como explosivas y actividad hidrotermal reciente, que le dan un carácter activo. El volcán no presenta cráter visible sino un conjunto de domos y domos-colada, que le confieren a la masa glaciaria un aspecto irregular en el que la topografía ha influido en la dinámica de deglaciación.

## METODOLOGÍA

A nivel mundial los glaciares se están monitoreando debido al fuerte derretimiento que han experimentado en las últimas décadas. Por su sensibilidad a los cambios climáticos resultan excelentes laboratorios para medir cambios atmosféricos. Adicionalmente los glaciares hoy día representan un recurso natural en detrimento y el agua producto de la fusión glaciaria debe ser medida para estudiar los impactos en las vertientes montañosas inferiores.

Los estudios glaciológicos en Colombia presentan dificultades para su desarrollo debido a que el acceso a estas áreas de alta montaña, es difícil y no siempre las condiciones de tiempo atmosférico son las mejores para realizar su monitoreo.

Tres componentes básicos se han recomendado a nivel internacional a los países con glaciares para su estudio: 1. Cálculo periódico del área glaciaria, 2. Medidas de retroceso del frente glaciario y 3. Cálculo de balances glaciológico, hidrológico y energético.

**Área glaciaria:** El cálculo de áreas glaciares se realiza con base en interpretación de fotografías aéreas o imágenes de satélite y su correspondiente proceso fotogramétrico o procesamiento digital. Las tecnologías actuales permiten saber con exactitud el área de una cobertura. Para las masas glaciares la fotogrametría

digital y las imágenes de satélite de alta resolución espectral y espacial permiten realizar eficientemente esta tarea. Para el caso de las fotografías aéreas existe el inconveniente de los costos de los vuelos, el software y las condiciones atmosféricas adversas. Para las imágenes de satélite aunque los costos han disminuido, existe el problema de la disponibilidad de imágenes, condiciones atmosféricas adversas (sensores pasivos) y la probabilidad que durante la adquisición de la imagen una nevada cubra un área más extensa de la superficie estrictamente glaciar (hielo) lo que genera errores en la interpretación y cálculos. Levantamientos geodésicos no han sido implementados y los topográficos se hacen anualmente en microcuencas glaciares de estudio.

El volumen de hielo de los glaciares colombianos sigue siendo tema de investigación. El método más exacto y directo consiste en la utilización de técnicas de prospección geofísica. La más utilizada es el uso de un radar de impulso con osciloscopio que determina el tiempo de viaje de ondas eléctricas desde la superficie hasta el manto rocoso.

#### **Medidas de retroceso longitudinal del frente glaciar:**

Consiste en medir desde puntos fijos cerca al límite inferior glaciar (rocas de gran tamaño o taludes de roca) la distancia hasta el límite inferior del hielo (no la nieve). Estas medidas se hacen utilizando una cinta métrica y siguiendo la pendiente. Periódicamente (dos veces al año) se mide la distancia entre el punto fijo y el borde inferior del hielo obteniéndose así una serie de datos que muestran las velocidades de retroceso. Es recomendable tener varios puntos de medición alrededor del glaciar y georreferenciarlos (GPS). Así mismo, en cada medida se registra con altímetro la altitud del borde del hielo y se toman fotografías del proceso. Estas medidas se han realizado desde 1986/88 por el IGAC y luego por el IDEAM, en el nevado Santa Isabel y en la sierra nevada de El Cocuy.

#### **Cálculo de balances glaciológico, hidrológico y energético:**

El Balance de Masa representa el equivalente de agua que gana o pierde un glaciar en un tiempo determinado (generalmente anual). Es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$b_i = \rho_0 \cdot \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

donde  $b_i$  corresponde al balance de masa en el sitio  $i$ ,  $\rho_0$  a la densidad del hielo (generalmente entre 0.82 a

0.92 g/cm<sup>3</sup>) y  $\Delta h$  a su cambio de espesor. El primer término de la ecuación representa el balance del hielo, mientras que el segundo representa el balance del material poroso (nieve, neviza) que cambia en función del tiempo (entre dos mediciones sucesivas). (Francou & Pouyand, 2004).

El balance es obtenido a partir de mediciones repetidas ya sea de manera directa (balance glaciológico) o indirecta (Balance hidrológico). (Francou & Pouyand, 2004). Para el método directo se instalan estacas o balizas (PVC o madera) dispuestas a lo largo de una microcuenca glaciar y enterradas sobre el hielo a una profundidad no menor a cinco metros sobre las cuales se realizan mediciones, preferiblemente mensuales, para determinar la pérdida de espesor de hielo (ablación glaciar).

Para perforar el hielo se utiliza un equipo que mediante vapor de agua caliente y a presión funde el hielo. La red de ablación glaciar debe ser complementada con levantamientos topográficos anuales para comprobar y establecer la pérdida de espesores y área en la microcuenca glaciar.

Para calcular un balance de masa se ha seleccionado el glaciar Conejeras en el nevado Santa Isabel localizado en el sector noroccidental el cual tiene un área aproximada de 0.5 Km<sup>2</sup>, donde fueron instaladas en marzo de 2006 una serie de 12 balizas, 3 cada 50 metros de altitud (entre 4680 y 4820 m.) con una profundidad de seis metros. La FIGURA 1 muestra el proceso de instalación de una baliza.

En la sierra nevada de El Cocuy se instalaron balizas en el glaciar Ritacuba Negro al noroccidente de la sierra en el mes de diciembre de 2006. Debido a la dificultad tanto para la instalación de la red de balizas como para llevar a cabo las mediciones con regularidad se cuenta con el apoyo de Ingeominas y Parques Nacionales.

El Balance Hidrológico consiste en medir los caudales de agua de una corriente que se origine en el glaciar. Se debe construir vertederos diseñados según el comportamiento hidráulico de la corriente y registrar periódicamente el nivel del agua para el cálculo del caudal. Este proceso se encuentra en la fase de diseño para los glaciares de estudio.



FIGURA 1. Instalación de una baliza de ablación en el nevado Santa Isabel.

El balance energético consiste en realizar el inventario de los flujos energéticos (radiativos, conductivos y turbulentos) entre el glaciar y la atmósfera, etapa fundamental para comprender físicamente cómo el glaciar responde a las variables meteorológicas y entonces, en consecuencia, al clima. (Francou & Pouyand, 2004). Para este balance es necesario instalar estaciones meteorológicas móviles sobre el glaciar.

Paralelamente a estas actividades se debe tener una estación climatológica cerca al glaciar que registre los diferentes elementos del clima (precipitación, temperaturas mínimas y máximas, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento) para poderlos correlacionar con los datos glaciológicos. Actualmente se encuentra operando desde finales de 2005 una estación automática satelital en la vertiente occidental del nevado Santa Isabel (4800m.) y otra en El Cocuy (4850m.) desde diciembre de 2006, los datos aun están en la fase de procesamiento.

## RESULTADOS

En Colombia existen actualmente seis glaciares o nevados. Ellos son:

- Sierra Nevada de Santa Marta (máx. altitud 5775m.)
- Sierra Nevada de El Cocuy (Chita o Güicán) (Cordillera Oriental, 5490m.)
- Volcán Nevado del Ruiz (Cordillera Central, 5320m.)
- Volcán Nevado Santa Isabel (Cordillera Central, 5110m.)
- Volcán Nevado del Tolima (Cordillera Central, 5280m.)
- Volcán Nevado del Huila (Cordillera Central, 5364m.)

De los seis, cuatro están sobre estructuras volcánicas clasificadas como activas (volcanes-nevados) y los dos restantes están sobre rocas no volcánicas (sierras nevadas de Santa Marta y El Cocuy). El área total se estima en aproximadamente 55 Km<sup>2</sup>, para el año 2002/2003. Desde la Pequeña Edad Glacial (siglos XVI a XVIII) los glaciares colombianos al igual que los del resto del mundo experimentan una pérdida de área y volumen cuyas causas son atribuidas al clima (y se cree que el efecto invernadero tendría una fuerte influencia). Como resultado de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, la evolución del área glaciar en Colombia se puede observar en la FIGURA 2 y las pérdidas comparativas entre dos periodos en la TABLA 1.

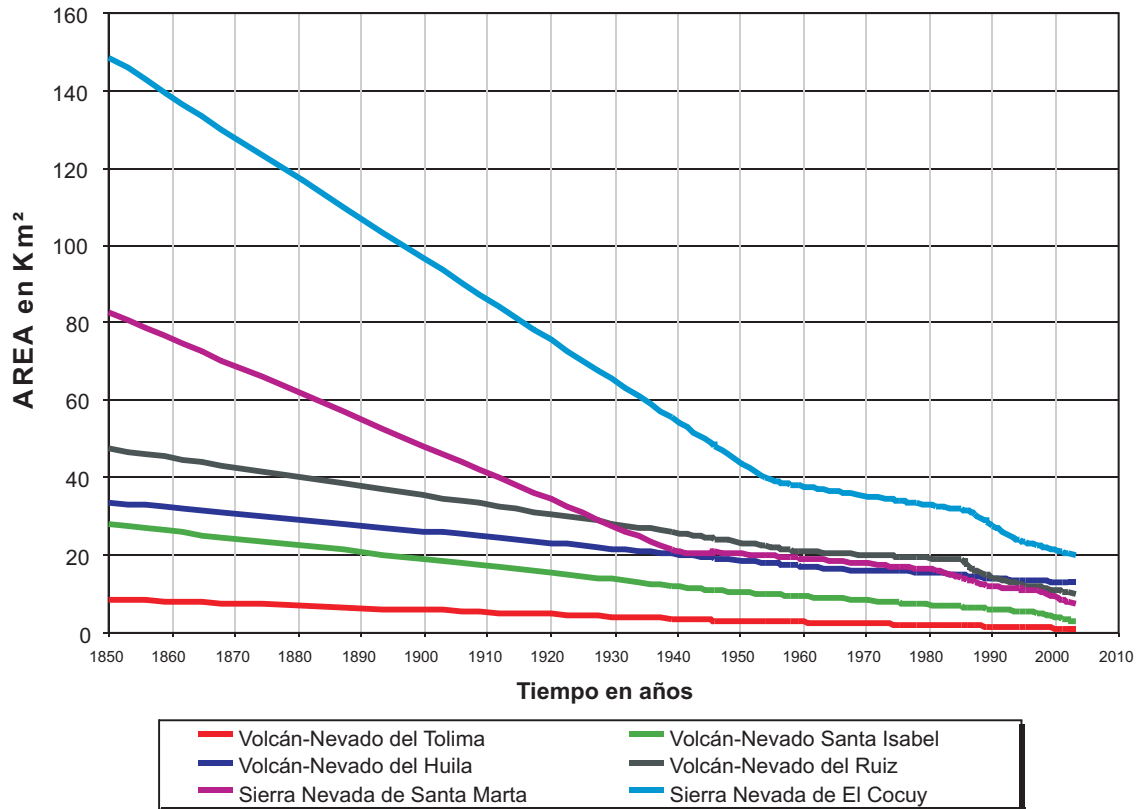


FIGURA 2. Evolución del área glaciár en los seis nevados actuales desde el final de la Pequeña Edad Glaciár (1850).

TABLA 1. Pérdida comparativa de área glaciár.

Glaciár	Pérdida de área entre periodos	
	1850-1954/59 (106 años aprox.)	1954/59 - 2001/03 (45 años aprox.)
SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA	76%	60%
SIERRA NEVADA EL COCUY	76%	49%
VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ	55%	51%
VOLCÁN NEVADO SANTA ISABEL	66%	65%
VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA	71%	62%
VOLCÁN NEVADO DEL HUILA	53%	25%

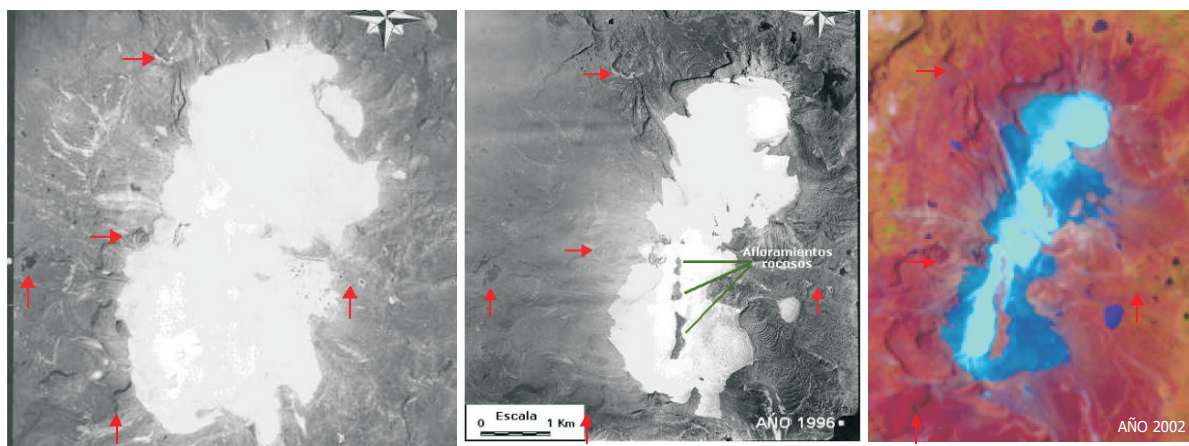


FIGURA 3. Cambio de área en el nevado Santa Isabel (Parque Nacional Los Nevados). Años 1959 (izquierda), 1996 (centro), 2002(derecha). (Fotografías aéreas IGAC e Imagen Landsat ETM)

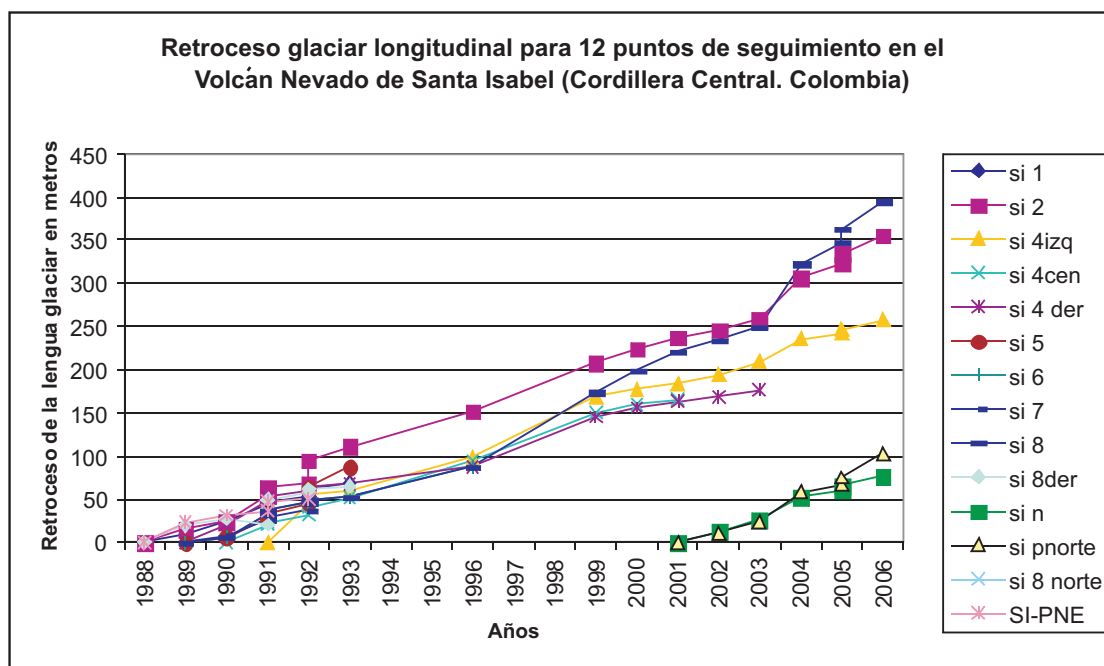


FIGURA 4. Retroceso glaciar longitudinal en el nevado Santa Isabel.

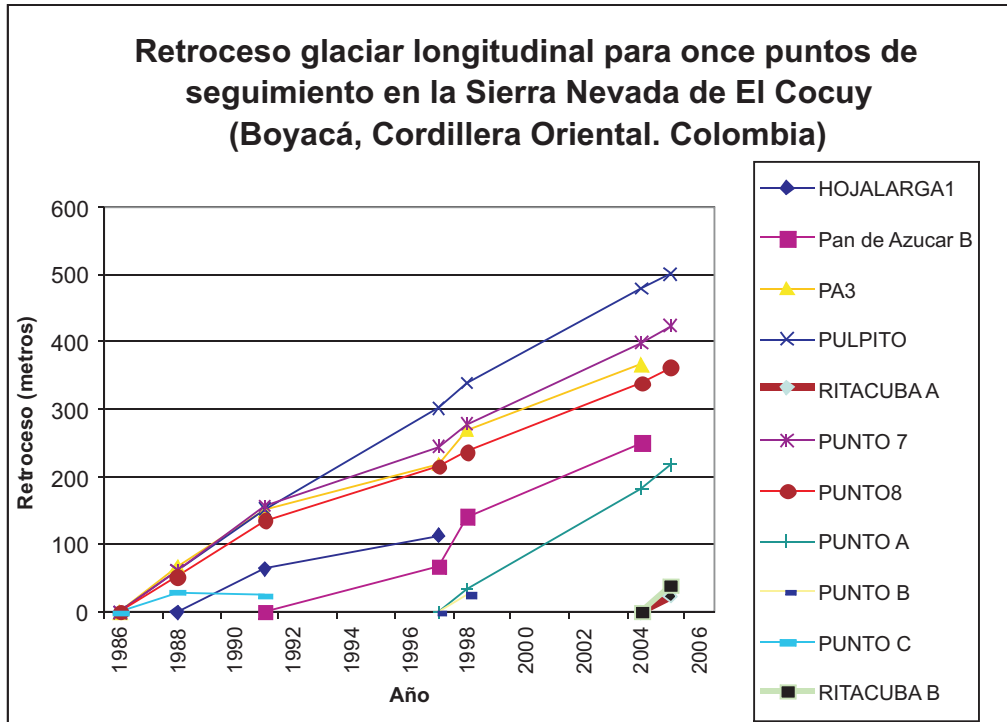


FIGURA 5. Retroceso glaciar longitudinal en la Sierra Nevada El Cocuy

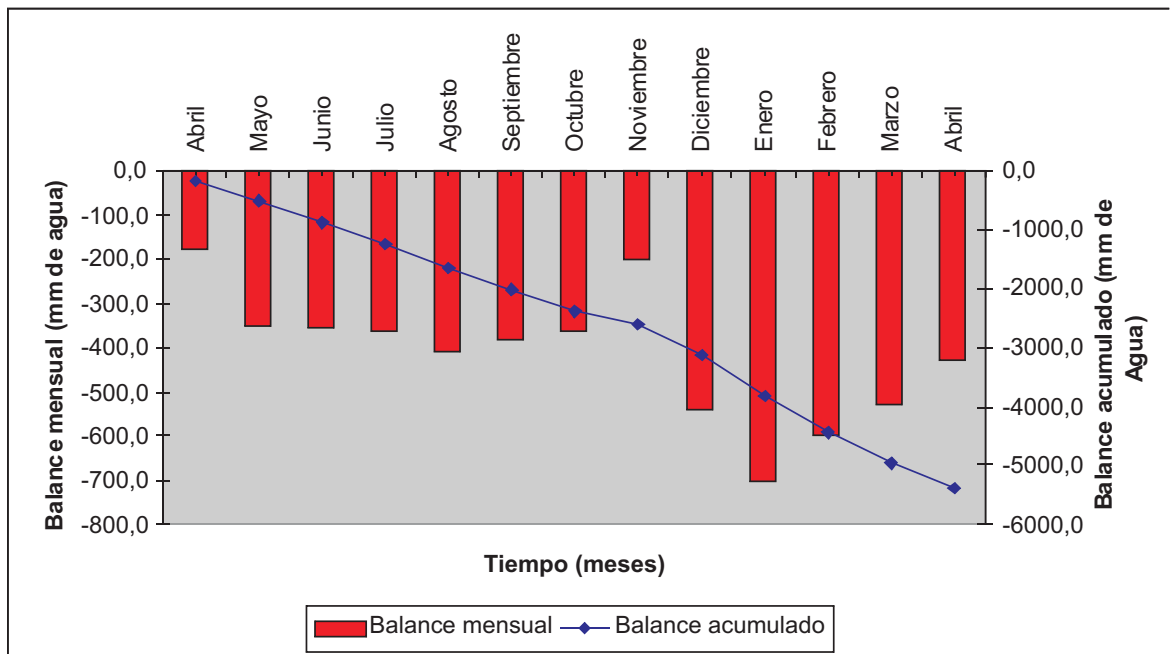


FIGURA 6. Balance de masa mensual y acumulado para el periodo marzo 2006 – abril 2007 en el glaciar Conejeras, nevado Santa Isabel.

Al observar la TABLA 1 es evidente que se ha acelerado la pérdida glaciaria para los últimos 50 años lo que podría indicar la influencia antrópica. Un claro ejemplo de la pérdida de área se aprecia en la FIGURA 3.

En cuanto al retroceso longitudinal del frente glaciario, las FIGURAS 4 y 5, muestran para los sitios medidos, la retirada del hielo que son comparables para ambos casos. Según estas observaciones el promedio de retiro lineal glaciario en Colombia se estima en alrededor de 20 metros por año con ligeras variaciones intranuales y depende de factores locales como la topografía del substrato rocoso, cantidad de material detrítico incorporado en el hielo, viento y exposición a la radiación.

Se ha logrado establecer una fuerte correlación estadística entre algunos elementos del clima (brillo solar, humedad relativa y temperatura máxima) y los datos de retroceso longitudinal en el volcán nevado Santa Isabel. La ecuación resultante es:

$$\text{Retroceso glaciario} = 97.3446 + 0.0136157 * \text{Brillo solar} - 1.23513 * \text{Humedad} + 1.70538 * T_{\text{max}}$$

(Euscátegui C., 2002).

Del análisis estadístico se destaca el coeficiente de determinación, el cual indicó que el comportamiento de las tres variables climáticas involucradas en el modelo de correlación, explican en un 97.2% la variabilidad del retroceso glaciario (Euscátegui C., 2002).

A partir de las mediciones mensuales de ablación en la red de balizas instaladas en el glaciar Conejeras, en el nevado Santa Isabel se tiene como resultado un balance negativo para el periodo marzo de 2006 – abril 2007 (FIGURA 6). Estas pérdidas reflejan el desequilibrio del glaciar su poca a nula acumulación (ganancias) lo cual sería, entre otros, una señal de la dinámica de la atmósfera.

Con base en la FIGURA 6 se puede subrayar que para el primer año de monitoreo se tiene una ablación o pérdida total de casi 5,3 metros de hielo en toda la superficie de el glaciar estudiado, de igual manera, a nivel mensual se presenta una relación entre la fusión glaciaria con la estacionalidad de las lluvias en esa región.

De otro lado esta investigación ha permitido corroborar que en el frente glaciario se presenta la mayor ablación

como resultado particularmente de una mayor temperatura ambiental que facilita la fusión del hielo así como menor acumulación de nieve que aumenta la exposición del glaciar a la radiación solar, otros procesos como los gravitacionales son también importantes para esta zona (debido a una mayor pendiente), mientras que en las partes más altas se presenta cobertura de nieve en un largo periodo del año generando un albedo mas alto lo que sumado a una menor temperatura atenúa el proceso de ablación.

Una situación interesante que se ha observado es la menor pérdida de espesor de hielo registrada en algunas balizas las cuales están cercanas a un escarpe de roca que puede actuar como barrera tanto de la radiación solar en horas de la mañana (sombra) como de los vientos; esto indicaría una fuerte influencia de la radiación solar y posiblemente de los vientos (sublimación) en el proceso de fusión glaciaria.

## DISCUSIÓN

- La información recopilada en campo y a través de fotografías aéreas e imágenes de satélite, es una importante evidencia de la dinámica glaciaria actual en Colombia durante los últimos 150 años que refleja una constante pérdida de hielo como reflejo de unas condiciones climáticas que favorecen este proceso, pero ha sido claro que se debe estudiar e detalle los flujos de energía entre el glaciar y la atmósfera para comprender mejor no solo la dinámica de los nevados sino la del clima.

- El comportamiento del retroceso corresponde a solo dos nevados colombianos pero según interpretaciones de fotografías aéreas y comparaciones con la evolución del área glaciaria, parece ser que puede ser similar para el resto. Los datos de ablación presentados ofrecen para un año de observación un panorama mas real acerca de la pérdida de masa glaciaria y solo con la perseverante toma de datos en campo se podrá conocer mejor esta compleja dinámica.

- Por otro lado es también apremiante determinar espesores reales por lo menos en los glaciares instrumentados a partir de lo cual sea posible calcular volúmenes y así poder estimar con mayor precisión la posible época de desaparición de las mencionadas áreas,



estableciendo escenarios futuros que permitan establecer medidas de adaptación frente al disponibilidad del recurso hídrico en la población directa o indirectamente afectada por esta disminución.

- De igual forma es importante comprender las relaciones existentes entre los ecosistemas relacionados con el sistema glaciar, especialmente con el páramo y los sistemas lagunares y esclarecer la verdadera dimensión del aporte de agua glaciar al ciclo del agua.

## CONCLUSIONES

- Los glaciares colombianos son restos de la última glaciación, con tendencia a la extinción y presentan un acelerado deterioro en las últimas décadas que ha sido asociado al efecto invernadero. Según los datos disponibles la pérdida de área anual es de 1 a 3%. El retroceso lineal del borde inferior glaciar esta entre 15 y 20 metros por año y aunque la dinámica glaciar es compleja y por conocer, se estima que en algunas décadas existiría muy poco de los nevados colombianos si continúan las actuales condiciones climáticas.

- El retroceso glaciar es un proceso que depende de muchas variables siendo las climáticas las más importantes. Otras como el sustrato rocoso, la topografía y la ubicación geográfica y altitudinal actúan secundariamente.

- Por ahora se establece que de acuerdo con la relación de asociación entre glaciar y clima, es el brillo solar el que incide en un alto porcentaje en el proceso de fusión del glaciar en la vertiente occidental del volcán nevado Santa Isabel, se presume que los flujos energéticos entre la radicación (onda corta y larga) y el glaciar tienen una gran parte de la respuesta a la dinámica glaciar.

## REFERENCIAS

Ceballos, J., Euscátegui, C., Ramírez, J. Huggel C. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. Septiembre, 2003. *Annals of Glaciology*.

Euscátegui, C. (2002). Estado de los glaciares en Colombia y análisis de la dinámica glaciar en el Parque Los Nevados, asociada al cambio climático global. Tesis de maestría, Universidad Nacional. Bogotá., Colombia

Francou, B., Pouyand, B. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. IRD. Bolivia. 243 p.

Favre, A. (1983). La subsidencia de la cuenca del Cocuy durante el Cretáceo y el Terciario inferior. En: IGAC, 1992. Los nevados de Colombia: glaciares y glaciaciones, en: análisis geográficos no. 22, IGAC, 95p.

IDEAM. (2001). Base de datos de brillo solar, humedad relativa, precipitación, temperaturas máximas y mínimas y número de días con precipitación. Bogotá.

IDEAM. (2004). Informe técnico de la evolución del volcán nevado Santa Isabel. Bogotá. Inédito. 15p.

IDEAM. (2005). Informe técnico de la comisión efectuada a la Sierra nevada del Cocuy. Bogotá. Inédito. 22p.

Tobón, E. (2004). Contribución a los proyectos de investigación realizados por la subdirección de geomorfología del IDEAM. "Actualización del mapa de sistemas morfogénicos. Caracterización y monitoreo de los glaciares colombianos. Cartografía de las formaciones superficiales del macizo colombiano". Tesis de Grado. Universidad de Caldas. Manizales. Colombia.

---

---

Trabajo recibido: febrero 17 de 2007

Trabajo aceptado: junio 22 de 2007