

---

# METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE FLUJO EN EL GLACIAR 'BUENOS AIRES', BAHÍA ESPERANZA, PENÍNSULA ANTÁRTICA

SANTIAGO YÉPEZ, WUILIAN TORRES  
y RAFAEL REBOLLEDO

---

## RESUMEN

La Primera Expedición Venezolana al Continente Antártico, llevada a cabo en marzo de 2008, estableció las bases para el análisis y futuro monitoreo del glaciar 'Buenos Aires', ubicado en la costa austral de Bahía Esperanza, Península Antártica, y actualmente en retroceso. Empleando datos de imágenes satelitales adquiridas a través de sensores HRV de los satélites SPOT-5 y 1, se proponen técnicas de detección espectral para cartografiar de manera semi-automática la cobertura de nieve/hielo. Esta información permite generar un modelo multi-tem-

poral, el cual puede ser usado como base para cuantificar la reducción de estas coberturas e identificar cambios que tienen lugar durante la regresión del glaciar. Adicionalmente, se desarrolló un análisis de correlación a nivel de sub-píxel, con el fin de generar vectores de desplazamiento, estudiando así la dinámica y descarga del flujo de nieve/hielo en la superficie del glaciar. Finalmente, un procedimiento de calibración fue desarrollado para validar los resultados del análisis de correlación llevado a cabo.

El estudio de los cambios que se producen en los glaciares permite tener una idea clara de la dinámica del clima en el planeta. Factores tales como el incremento de la temperatura global y la disminución del volumen de precipitaciones son, en esencia, las principales causas del retroceso de esas masas de hielo.

Ya sea por factores naturales o debido a la actividad antrópica, el clima en la Tierra está cambiando. Muchos científicos a nivel mundial debaten todavía si estos procesos de cambio climático tienen un origen natural o antropogé-

nico; lo que si es cierto, es que muchos glaciares tanto polares como continentales se encuentran en franco estado de regresión.

Entre las causas naturales de esa regresión se puede citar las oscilaciones cíclicas de la radiación solar, debidas a variaciones orbitales u oscilaciones por la actividad volcánica. Por ejemplo, hoy en día se tiene una órbita más circular de la Tierra con respecto al Sol, a diferencia de épocas glaciares remotas cuando está tendía a ser más elíptica (Tarruck, 2000). Por otro lado, hay que considerar la actividad del hombre, directamen-

te relacionada con el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, dado el aumento exponencial en el uso de combustibles fósiles y a la creciente actividad industrial (Tett *et al.*, 2002).

En las últimas décadas la Antártida se ha convertido en un laboratorio natural, en el cual el monitoreo de las capas glaciares tiene particular importancia para el estudio de los efectos del cambio climático, específicamente el calentamiento global.

El área de estudio seleccionada para el análisis con las imágenes SPOT fue el glaciar 'Buenos Aires', ubica-

---

**PALABRAS CLAVE / Antártida / Bahía Esperanza / Cambio Climático / Glaciar / SIG 3D /**

---

Recibido: 15/07/2010. Modificado: 02/05/2012. Aceptado: 03/05/2012.

**Santiago Yépez.** Ingeniero Geólogo, Universidad Central de Venezuela (UCV). M.Sc. en Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar (USB), Venezuela. Profesional de Investigación y Desarrollo, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI), Fundación Instituto de Ingeniería para la Investigación y el Desarrollo Tecnológico (FIIDT), Venezuela. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela. Centro de Oceanología y Estudios Antárticos (COEA), Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Dirección: CPDI - FIIDT. Carretera Nacional Hoyo de la Puerta-Baruta, Urb. Monte Elena II, Altos de Sartenejas. Apartado Postal 40200, Caracas 1040-A, Venezuela. e-mail: syopez@fii.gob.ve

**Wuilian Torres.** Doctor en Procesamiento de Datos, Université de Rennes, Francia. Profesional de Investigación y Desarrollo, FIIDT, Venezuela. Profesor, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Centro de Oceanología y Estudios Antárticos, IVIC, Venezuela. e-mail: wtorres@fii.gob.ve

**Rafael Rebolledo.** Ingeniero Civil, Universidad de Carabobo, Venezuela. M.Sc. en Fotogrametría y GIS, Hochschule für Technik, Stuttgart, Alemania. Candidato a Dr., Profesional de Investigación y Desarrollo, FIIDT, Venezuela. Centro de Oceanología y Estudios Antárticos, IVIC, Venezuela. e-mail: rafaelr@fii.gob.ve

---

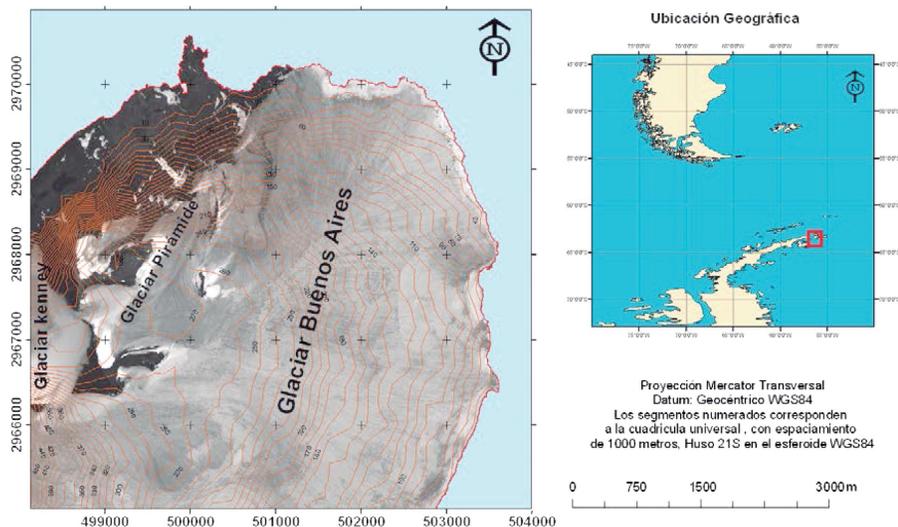


Figura 1: Área de estudio en Bahía Esperanza, Península Antártica: glaciar ‘Buenos Aires’.

do en la costa austral de Bahía Esperanza, en el extremo noreste de la Península Antártica, cubriendo un área de ~29km<sup>2</sup> (Figura 1). Se trata de uno de los glaciares de la península que se encuentra actualmente en estado de retroceso.

Este estudio tiene por objeto la identificación de patrones de cambio en la cobertura del glaciar a través del tiempo, usando imágenes satelitales de alta resolución espacial SPOT, tomadas solamente durante el verano austral. En este tipo de estudio son generalmente utilizadas metodologías tradicionales como lo es el índice de diferencia normalizada de nieve; sin embargo, en este caso se optó por la utilización de técnicas basadas en morfología matemática. Esta última herramienta resultó más eficaz, ya que presentó una menor mezcla espectral en la detección de borde de las coberturas de nieve/hielo.

Por otra parte, se aplicó un análisis de correlación a dos imágenes de distintas fechas para calcular vectores de desplazamiento, estimando así velocidades del flujo de la nieve y el hielo en la parte superficial de la masa glaciar.

En el caso particular de este estudio se utilizaron siete imágenes con datos asociados a los sensores HRV del SPOT 5 y 1 en modo pancromático y multiespectral, únicas escenas hasta ahora tomadas sobre Bahía Esperanza con una baja cobertura de nubes desde los años 80 hasta la actualidad.

### Detección Espectral Semiautomática en Imágenes SPOT por Morfología Matemática

La detección de coberturas de hielo y nieve llevada a cabo en esta estudio se basa en morfología ma-

temática, involucrando técnicas de segmentación de imagen. En éstas se asume que objetos en la imagen están conectados por regiones con poca variación en los niveles de escala de grises, mientras que variaciones altas en los niveles de escala de grises entre dos píxeles adyacentes pueden indicar que esos dos píxeles pertenecen a diferentes objetos (Soille, 2003). Dentro de la técnica de segmentación, se utilizó la transformación de *watershed*, la cual considera la imagen en escala de grises como una representación topográfica.

Suponiendo que se deja caer agua en tal superficie topográfica, de acuerdo a la ley de gravedad, ésta fluirá hacia abajo, a lo largo de las pendientes más pronunciadas hasta alcanzar un mínimo. El grupo completo de puntos de esta superficie, cuyas trayectorias de pendientes más abruptas alcanza un mínimo, constituye la ‘cuenca de captura’ (Figura 2). Las ‘líneas de cuenca’ son las zonas que dividen las cuencas de capturas adyacentes, las cuales corresponden a los límites de objetos en la imagen (Soille, 2003).

En el caso particular de las imágenes SPOT se seleccionaron mínimos asociados al domo del glaciar, los nunataks, el mar, la zona periglacial y el glaciar ‘Flora’ (Figura 2). Un mayor realce de la transformación de *watershed* se logra con un grupo de marcadores definidos previamente, eliminando así efectos por sobre-segmentación. En total, nueve marcadores de mínimos fueron seleccionados en la imagen para calcular su gradiente, lográndose dividir el área de estudio en igual número de regiones. La ventaja de esta técnica es que permite, de una ma-



Figura 2: Clasificación morfológica del glaciar ‘Buenos Aires’ usando técnicas de segmentación.

nera rápida, discriminar regiones en la imagen teniendo control directo de los objetos que se quiere identificar, lo cual a veces se hace difícil con el uso de técnicas basadas en cocientes de bandas o en la utilización de clasificaciones supervisadas, donde la mezcla espectral afecta de manera notoria el resultado de la caracterización espectral.

### Análisis de Detección de Cambio

La cobertura glaciar corresponde, en orden de importancia, a los glaciares ‘Buenos Aires’ (casquete en regresión), una porción del ‘Kenney’ y el ‘Pirámide’ como glaciares de valle de tipo islándico (de escape) y, por último, el pequeño glaciar ‘Flora’, casi reducido a un glaciar ‘de Circo’, presentando aún cierta conexión lateral en su flanco sureste con el glaciar ‘Buenos Aires’. La divisoria del ‘Monte Flora’ dibuja un conjunto de aristas largas y afiladas, mientras que otros nunataks de la región presentan la típica forma piramidal o *hörn* (Nozal *et al.*, 2007).

En el análisis de detección de cambio es posible observar una marcada regresión en el límite oriental del domo del glaciar, principalmente el cambio abrupto se hace notorio entre los años 1990-2006 (Figura 3), donde la regresión en la línea de costa se produce de manera drástica, alcanzando en algunos casos hasta 250m de separación. Por su parte, en su cara norte el casquete pareciera estar afectado en menor proporción, observándose separaciones entre 90 y

100m. Si bien los cambios entre los años 1988, 1989 y 1990 no son tan evidentes como el salto entre los años 1990-2006, esto puede deberse en cierta medida a que las imágenes son de años consecutivos y, por ende, no se producen variaciones importantes. Ahora bien, desde otro punto de vista, relacionándolo con el comportamiento de la temperatura, al analizar el registro de la base de datos meteorológica de la Estación Argentina Esperanza (Figura 3) se observa que las temperaturas registradas entre los años 1988 y 1990 presentan una tendencia parecida, con valores que promedian los  $-0,47$  y  $0,70^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente, a partir del año 1992, se aprecia una tendencia de aumento en el valor de la temperatura hasta alcanzar un valor máximo de  $2,47^{\circ}\text{C}$  en 2006. Si bien es claro que hay una relación directa entre el aumento atípico de temperatura con el proceso de regresión en este casquete, es necesario entender mejor la dinámica del glaciar antes de poder afirmar que estos eventos están relacionados a procesos de cambio climático.

### Análisis de la Dinámica del Glaciar Usando Técnicas de Correlación

La técnica de correlación permite estimar el desplazamiento de un punto de una imagen respecto a otra imagen de referencia (Figura 4). Se delimita el entorno del píxel bajo estudio por medio de una ventana rectangular, y a partir de un conocimiento aproximado del margen máximo de desplazamiento se delimita la región de búsqueda del píxel desplazado. Para identificar la nueva posición se hace la correlación de la ventana rectangular en la imagen de referencia con una ventana de la misma dimensión centrada en cada píxel de la región de búsqueda. La correlación tendrá un valor máximo en su nueva posición. Esta ventana rectangular estará relacionada a la incertidumbre sobre la posición del píxel en la imagen secundaria (Berthier *et al.*, 2005).

Para este análisis se utilizó un par de imágenes

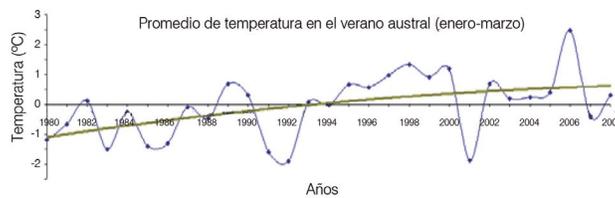
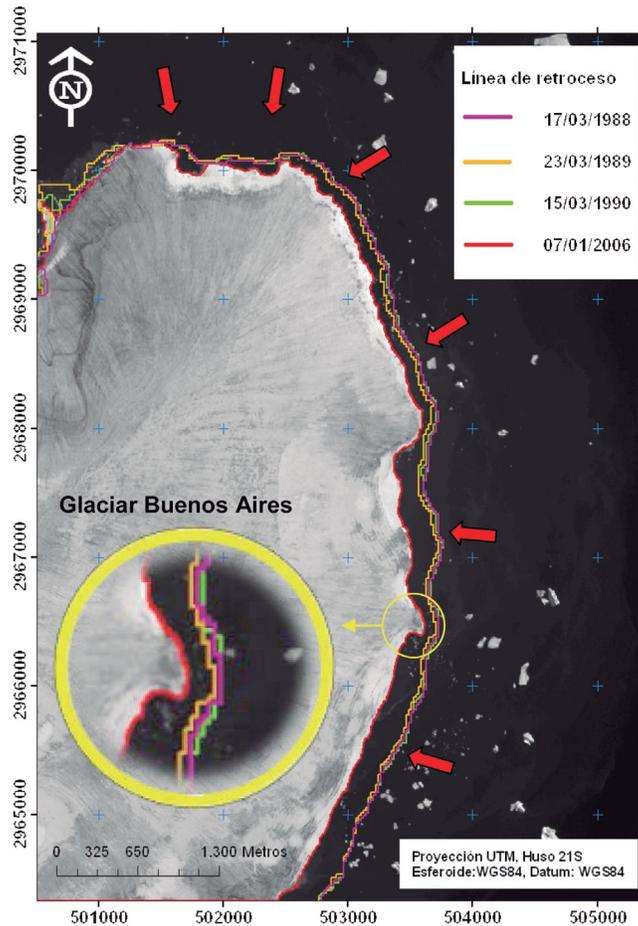


Figura 3: Evolución del glaciar 'Buenos Aires' desde el año 1988 hasta el 2006 y registro de temperatura.

de SPOT-5 del año 2006 (correspondientes al verano austral), las cuales tienen una diferencia de adquisición de cinco días, con lo cual se busca estimar la velocidad y dirección de descarga del flujo del glaciar 'Buenos Aires'.

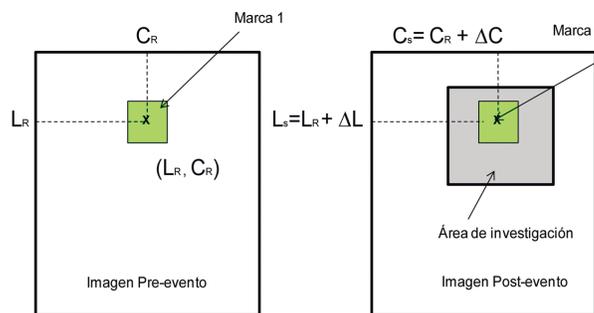


Figura 4: Principios básicos de la técnica de correlación.

El programa utilizado para el análisis fue el COSI-corr, diseñado en un principio para la detección de deformaciones cosísmicas (Leprince *et al.*, 2007, 2008). Esta aplicación fue diseñada en el lenguaje IDL e incorporada a la plataforma ENVI como una extensión. Su aplicación permite el procesamiento de fotografías aéreas, así como imágenes satelitales, incluyendo los sensores SPOT, ASTER y Quickbird. Es importante resaltar que los ángulos de toma de las imágenes tienen que ser similares para poder obtener resultados satisfactorios.

La metodología para estimar velocidades a partir de imágenes conlleva a una serie de procesos que deben aplicarse antes de llevar a cabo la correlación (Figura 5). Una serie de puntos de control en el terreno se genera de manera automática. Estos puntos son creados a partir de una imagen cruda binaria (esclava) con respecto a una imagen previamente ortorectificada (maestra). El modelo de elevación digital utilizado en el proceso de ortorectificación es del Proyecto de Mapeo Antártico de RADARSAT (Noltimier *et al.*, 1999).

Una vez que los procesos de corrección geométrica y de orto-corrección han sido aplicados, los desplazamientos horizontales del terreno son recuperados de la correlación a nivel de sub-píxel de estas imágenes. Esta correlación se basa en un proceso que estima el plano de la fase en el dominio de Fourier. Este análisis produce dos imágenes de correlación, cada una de ellas representando la componente de desplazamiento horizontal del terreno (este-oeste y norte-sur), y una imagen asociada a la relación de señal-ruido (SNR por las siglas del inglés *signal to noise ratio*) para cada medición, la cual sirve para evaluar la efectividad de los resultados (Figura 6).

A partir de las imágenes norte-sur y este-oeste se puede generar los vectores de desplazamiento, revelando de esta manera los patrones de flujo del hielo y la nieve en la parte superficial del glaciar. Además, es posible conocer el gradiente de la velocidad, ya que

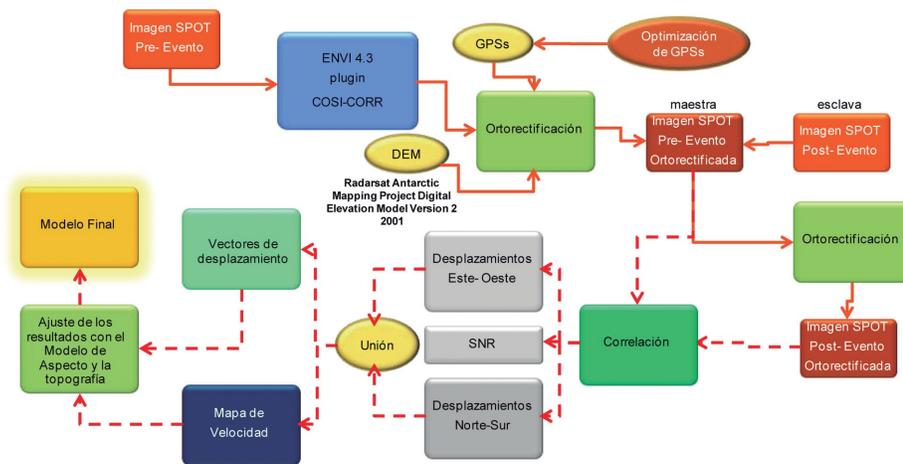


Figura 5: Metodología para estimar la velocidad de desplazamiento y descarga de flujo de nieve/hielo.

se conoce la distancia  $D$ , obtenida a partir de la ecuación

$$D = \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2}$$

donde  $Dx$ : desplazamientos este-oeste y  $Dy$ : desplazamientos norte-sur.

Debido a que el tiempo de separación de las imágenes es de cinco días, y la hora de toma del satélite para el área es la misma, es posible crear un mapa de desplazamiento. Evaluando las estadísticas en el mapa de desplazamiento es posible observar que las velocidades mínima y máxima se ubican entre 0 y 2139 cm/día, respectivamente, mientras que la velocidad media en la escena es de 185cm/día (Figura 7).

### Calibración de los Resultados del Proceso de Correlación

La calibración consiste en ajustar los resultados del proceso de correlación usando información topográfica derivada de una fuente completamente distinta a las imágenes satelitales. La calibración se hace desde dos evaluaciones distintas: la primera consiste en relacionar el ángulo acimutal de los vectores de desplazamiento con el mapa de aspecto; la segunda relaciona el perfil de velocidad con el perfil topográfico,

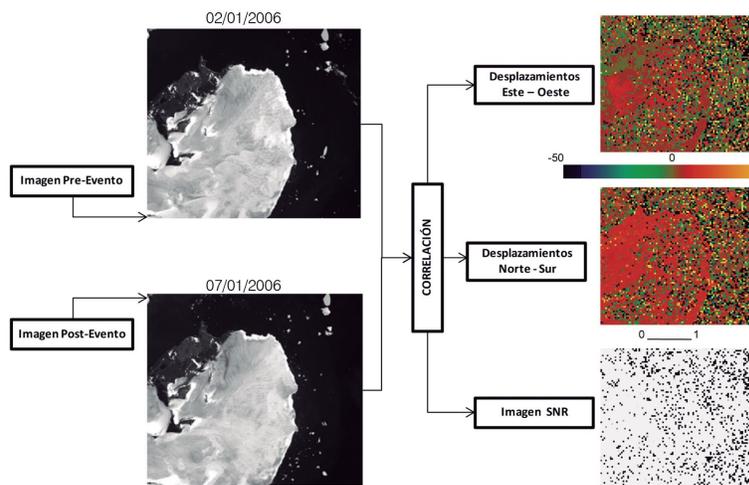


Figura 6: Proceso de correlación entre las dos imágenes SPOT-5 con una diferencia en tiempo de 5 días.

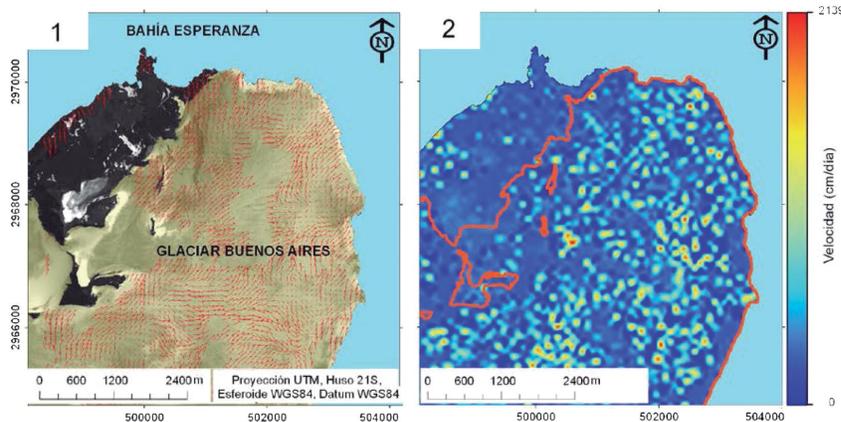


Figura 7: Velocidad de desplazamiento normalizada a velocidades diarias en centímetros.

co, correspondiente a la misma transecta sobre el domo del glaciar.

En la primera evaluación, los ángulos acimutales de los vectores de desplazamiento son calculados y posteriormente comparados con el mapa de aspecto (Figura 8).

Como se mencionó anteriormente, los vectores de desplazamiento son generados a partir de dos imágenes de desplazamiento horizontal (este-oeste y norte-sur), mientras que el mapa de aspecto (modelo independiente de la correlación) es obtenido directamente del modelo de elevación digital del terreno, el cual simplemente proporciona la dirección de la pendiente, la cual es clasificada, según un rango de orientación (norte, este, oeste, sur, etc.) o el ángulo acimutal (entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ ).

Para efectos de este artículo, se eligió como área piloto las pendientes del glaciar con orientación norte entre  $0-22,5^\circ$  y  $337,5-360^\circ$  y nor-este entre  $22,5-67,5^\circ$ . Los resultados de la comparación entre el ángulo acimutal de los vectores de desplazamiento y el modelo de aspecto se pueden apreciar en la Figura 9.

De acuerdo a estos resultados, es notable la alta coherencia entre la orientación de los vectores de desplazamiento y la orientación de las pendientes, aún cuando el modelo de aspecto posee una resolución espacial de 200m, mucho menor al de las imágenes SPOT-5. Este hecho le otorga una alta confiabilidad al proceso de correlación (entre 44,7 y 78,65%). Es de hacer notar que estos resultados corresponden solamente a una sección representativa del área total de estudio.

Para la segunda evaluación, se consideró una transecta sobre la superficie del glaciar y se generó un perfil sobre la imagen de velocidades (Figura 10), y posteriormente desde la misma transecta se produjo el perfil topográfico. El análisis busca estudiar las fluctuaciones de las velocidades, estableciendo relaciones con los cambios de pendiente en el perfil topográfico. Como se puede apreciar en la Figura 11, los picos en el perfil de velocidad corresponden en gran medida a cambios de pendientes favorables en la dirección de flujo. En algunos segmentos se observaron resultados no coherentes (pendiente as-

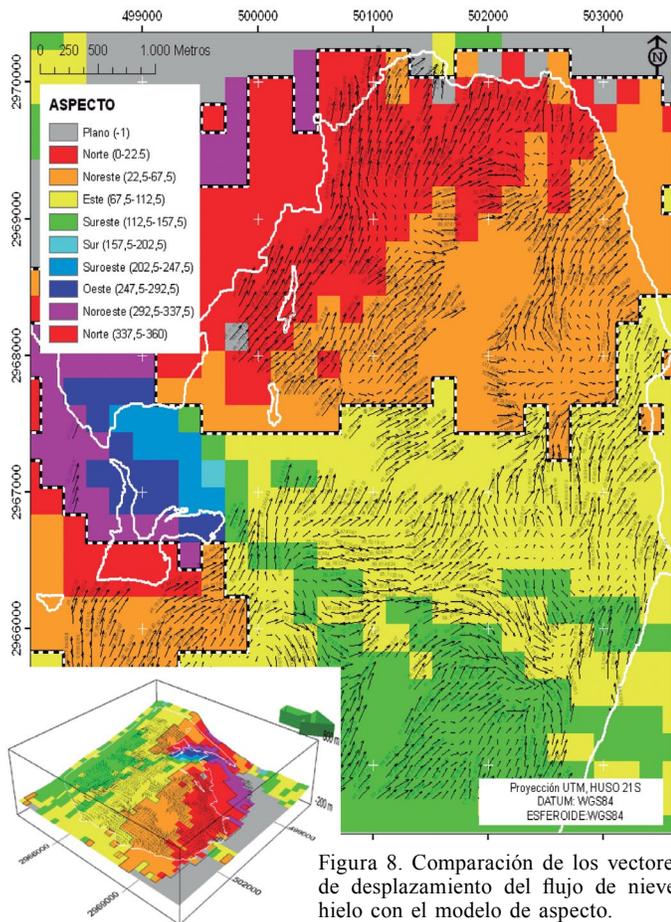


Figura 8. Comparación de los vectores de desplazamiento del flujo de nieve/hielo con el modelo de aspecto.

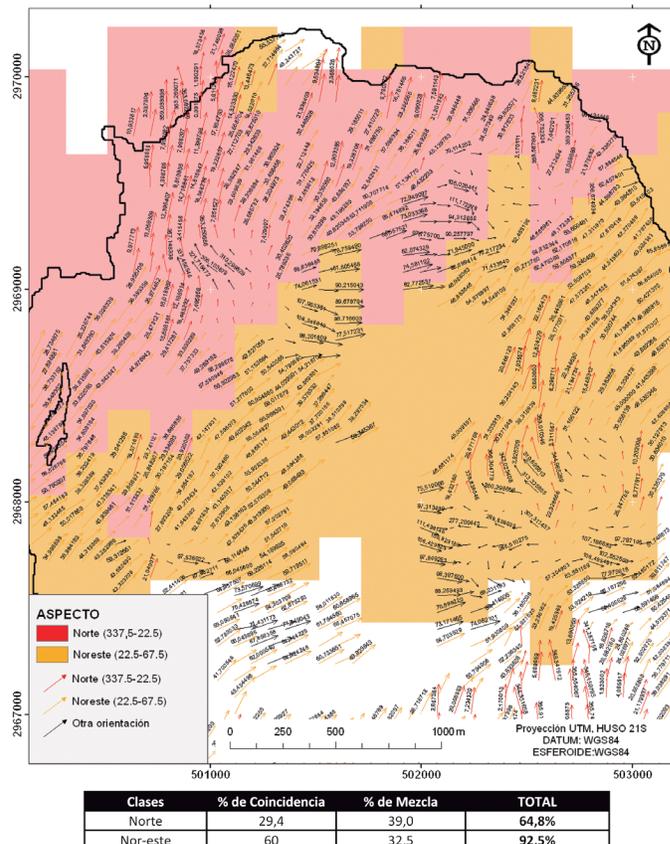


Figura 9. Comparación del ángulo acimutal de los vectores de desplazamiento con la dirección de las pendientes.

pendente con un aumento de velocidad), lo cual podría ser producto de un efecto inercial de la masa en movimiento.

De igual forma, hacia la línea de costa se observaron resultados no satisfactorios en cuanto a la correspondencia con el modelo topográfico, tal vez como consecuencia de los efectos de borde en la línea de costa. Cabe recordar que este DEM (por las siglas del inglés *digital elevation model*) tiene una resolución espacial de 200m y si se contara con un modelo de elevación del terreno de mayor resolución espacial el porcentaje de coherencia de los datos se incrementaría. Sin embargo, en general los resultados indican una buena coherencia entre las velocidades obtenidas a partir de modelo de correlación con el contorno del terreno modelado a través del DEM.

### Conclusiones

El uso de técnicas basadas en morfología matemática (segmentación) para la identificación de patrones de cambio en la cobertura del glaciar, re-

sultó ser eficaz para la delimitación de coberturas de nieve/hielo, ya que la confusión en la identificación de objetos distintos se reduce significativamente.

Si bien se puede suponer que eventos de regresión de la masa glaciar como éstos pudieran estar relacionados al

calentamiento global, solo el análisis en más profundidad y en una dimensión de tiempo mayor permitirá establecer una relación directa con procesos de cambio climático.

Se demostró que el análisis de correlación es consistente con los procesos dinámicos en la superficie del glaciar; sin embargo, es necesario desarrollar controles de calibración de los datos que permitan evaluar la calidad de los resultados usando modelos independientes tales como: perfiles de velocidad, mapas de aspecto o mediciones de GPS en modo diferencial.

El adelanto en este tipo de metodologías representa un progreso en los estudios de dinámica de glaciares, sobre todo en zonas tan remotas, donde las mediciones con técnicas tradicionales resultan extremadamente costosas y la logística para la recolección de datos es complicada. Es importante continuar el análisis de correlación con imágenes multi-temporales con el fin de establecer si ciertamente el incremento atípico de la temperatura es esta zona ha activado un proceso de regresión en las masas

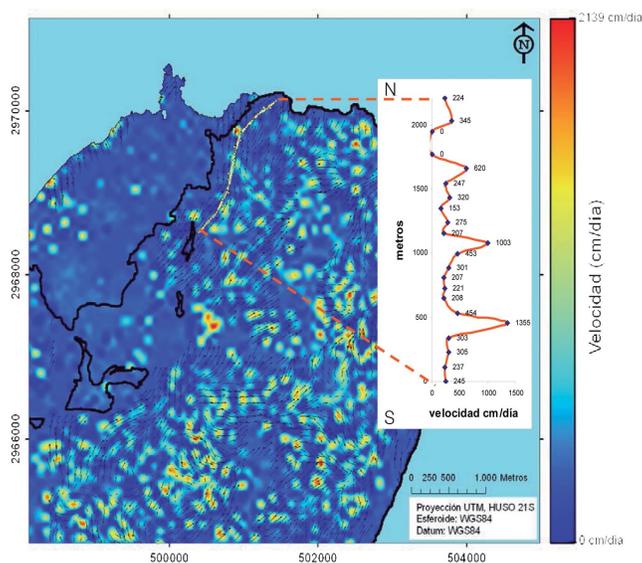


Figura 10. Perfil de velocidad de flujo de nieve/hielo en el glaciar 'Buenos Aires'.

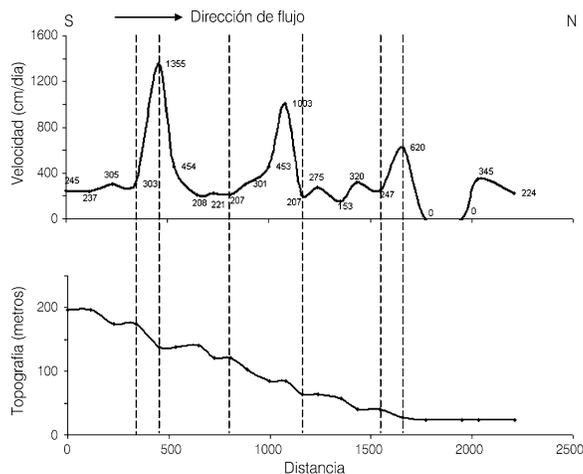


Figura 11. Comparación del modelo topográfico con el perfil de velocidad.

glaciares de la Península Antártica como resultado del calentamiento global.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa SPOT Image por el suministro

de las imágenes SPOT en el marco de la iniciativa *Planet Action*, la cual promueve estudios relacionados a procesos de cambio climático. Esta investigación es parte del Programa Científico Antártico Venezolano y fue financiada por el Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología de Venezuela.

#### REFERENCIAS

- Berthier E, Vadon H, Baratoux D, Arnaud Y, Vicent C, Feigl KL, Rémy F, Legrésy B (2005) Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. *Rem. Sens. Env.* 95: 14-28.
- Leprince S (2008) *Monitoring Earth Surface Dynamics with Optical Imagery*. Tesis. California Institute of Technology. Pasadena, CA, EEUU. 274 pp.
- Leprince S, Barbot S, Ayoub F, Avouac JP (2007) Automatic, precise, ortho-rectification and co-registration for satellite image correlation: Application to sismotectonics, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 45: 1529-1558.
- Noltimier KF, Jezek KC, Sohn HG, Li B, Liu H, Baumgartner F, Kaupp V, Curlander JC, Wilson B, Onstott R (1999) RADARSAT Antarctic Mapping Project - mosaic construction. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 1999. IGARSS. Proc. IEEE 1999 International* 5: 2349-2351.
- Nozal F, Martín-Serrano A, Montes M, del Valle R (2007) Ablación glaciaria y procesos activos en la costa austral de bahía Esperanza (Península Antártica). *VI Simp. Argentino y III Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas*. Instituto Antártico Argentino. (10-14/09/2007). pp. 1-4.
- Soille Pierre (2003) *Morphological Image Analysis. Principles and Applications*. 2<sup>a</sup> ed. Springer. New York, EEUU. 391 pp.
- Tarbut EJ, Lutgens FK (2000) *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Prentice-Hall. Madrid, España. 612 pp.
- Tett SFB, Jones GS, Stott PA, Hill DC, Mitchell JFB, Allen MR, Ingram WJ, Jophns TC, Johnson CE, Jones A, Roberts DL, Sexton DMH, Woodage MJ (2002) Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change. *J. Geophys. Res.* 107. 24 pp. doi:10.1029/2000JD000028

## METODOLOGY FOR FLOW ESTIMATION IN THE 'BUENOS AIRES' GLACIER, HOPE BAY, ANTARCTIC PENINSULA

Santiago Yépez, Wuilian Torres and Rafael Rebolledo

### SUMMARY

The First Venezuelan Expedition to the Antarctic Continent, on March 2008, laid the groundwork for future analysis and monitoring of the 'Buenos Aires' glacier, located in the austral coast of Hope Bay, Antarctic Peninsula, and currently experiencing a backward movement process of the ice mass. By using SPOT-5 and 1 satellite data from HRV sensors, techniques of spectral detection are proposed for mapping snow/ice cover using a semi-automatic procedure. This information allows for

creating a multi-temporal model, which can be used to quantify the reduction of the covers and to identify changes occurring during the regression of the glacier. Additionally, an analysis of sub-pixel correlation was developed with the purpose of generating displacement vectors to understand the dynamics of snow/ice flow on the surface of the 'Buenos Aires' glacier. Finally, a calibration procedure was carried out in order to validate the results of the correlation analysis performed.

## METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DE FLUXO NO GLACIAR 'BUENOS AIRES', BAHÍA ESPERANZA, PENÍNSULA ANTÁRTICA

Santiago Yépez, Wuilian Torres e Rafael Rebolledo

### RESUMO

A Primeira Expedição Venezuelana ao Continente Antártico, realizada em março de 2008, estabeleceu as bases para a análise e futuro monitoramento do glaciário 'Buenos Aires', situado na costa austral de Bahia Esperanza, Península Antártica, e atualmente em retrocesso. Empregando dados de imagens de satélite adquiridas mediante o uso de sensores HRV dos satélites SPOT-5 e 1, propõem-se técnicas de detecção espectral para cartografar de maneira semiautomática a cobertura de neve/gelo. Esta informação permite gerar um modelo multitemporal,

o qual pode ser usado como base para quantificar a redução destas coberturas e identificar mudanças que têm lugar durante a regressão do glaciário. Adicionalmente, foi desenvolvida uma análise de correlação ao nível de subpixel, com o fim de gerar vetores de deslocamento, estudando assim a dinâmica e descarga do fluxo de neve/gelo na superfície do glaciário. Finalmente, um procedimento de calibragem foi desenvolvido para validar os resultados da análise de correlação realizada.