

Cuantificación del cambio del área glaciar del nevado Huaytapallana utilizando imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5

Marcos Gabriel Cerna Arellan¹
Wilson Suarez Alayza¹
Juan Julio Ordoñez Gálvez¹

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI
Lima 11 - 785 - Jr. Cahuide - Jesús María, Perú.

{mcerna, jordonez}@senamhi.gob.pe
wil_suarez@hotmail.com

Abstract. The current weather conditions are contributing significantly to accelerated glacier retreat in the tropical Andes and this decline can be measured considering remote sensing techniques. This paper has considered sensor images Landsat-5 satellite TM with resolution of 30 m by pixel to quantify the glacier area change Huaytapallana snowy mountain range located in the central region of Peru. The technique that has been used is the delineation of glacier coverage from Normalized difference snow Index (NDSI) and the of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The Huaytapallana snowy at the rate of reduction of 0,52 km²/year has fallen 13,52 km² in 26 years (1985-2010) representing 48,4% from the year 1985 and if the weather remains of the past two decades could back up considerably in the not too distant disappear. On the other hand, is identified from glacier hypsometry generated with digital elevation model ASTER GDEM, the ablation zone of Huaytapallana snowy is shifting to higher regions of the mountain.

Palabras clave: Andean glaciers, changes in glacier area, digital elevation model (DEM), Landsat-5 satellite images.

1. Introducción

El conocimiento de la superficie glaciar es esencial para la estimación del volumen de agua producida por la fusión de la nieve y que drena hacia las diversas cuencas hidrológicas. El objetivo principal de este trabajo es presentar un método operativo para el cálculo de la variación del área glaciar de los Andes Tropicales. Este trabajo es parte del estudio realizado en la componente glaciológico del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA).

Para calcular el área glaciar a partir de imágenes satelitales, se sigue las leyes fundamentales de la Teledetección como son: corrección radiométrica, corrección geométrica, corrección atmosférica, entre otros. Una imagen de satélite en bruto contiene unos valores denominados niveles digitales (ND) que el satélite obtiene a partir de la energía recibida. Para recuperar los valores de energía recibida, es necesaria la corrección radiométrica. Luego, la reflectividad es la variable fundamental cuyo cálculo permite aplicar otro tipo de técnicas para hacer investigación en ciencias de la Tierra. Es la parte de la irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre que se refleja de nuevo a la atmósfera.

El índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenidos de la reflectancia de las imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5 permiten delimitar el área glaciar. El rango de NDSI que se considera es 0,52 – 1 (Silverio *et Jaquet*, 2005). El principal problema que surge al aplicar este método es la confusión que se produce entre áreas cubiertas de hielo y zonas de umbría (parte de terreno en que casi siempre hace sombra, por estar expuesta al norte). Aplicamos un primer umbral

para fijar un valor límite para la detección de las áreas cubiertas por glaciares (NDSI). Luego se realiza un segundo enmascaramiento, según la cual se eliminarán de la selección previa aquellas zonas cuya reflectancia fuera inferior al valor límite de reflectancia. La reflectancia de las distintas superficies varía de acuerdo a las longitudes de onda (Klein *et al.*, 1998).

Debemos considerar al momento de la elección de las imágenes, la serie histórica de los datos de precipitación medidos próximos al nevado Huaytapallana, para tener una imagen libre de cobertura de nieve y evitar en la medida de las posibilidades la medición de la nieve fresca.

1.1 Área de estudio

El área de estudio comprende la Cordillera Huaytapallana. Dicha cordillera es una cadena montañosa de la región central del Perú que se extiende unos 20 km en dirección Norte-Sur por el territorio del departamento de Junín. La Cordillera se encuentra cubierta de nevados con una superficie glaciara de 13,4 km², siendo su máxima elevación el nevado Huaytapallana, con 5 557 m. El sistema hidrográfico de ésta pequeña cordillera drena hacia la cuenca del río Amazonas mediante los ríos Perené y Mantaro. La cordillera se encuentra a 22 km al noreste de la ciudad de Huancayo. Está comprendido entre los 11°47'55" y 11°57'15" de latitud Sur y los 75°05'55" y 74°58'15" de longitud Oeste del meridiano Greenwich, atravesando las provincias de Concepción y Huancayo.

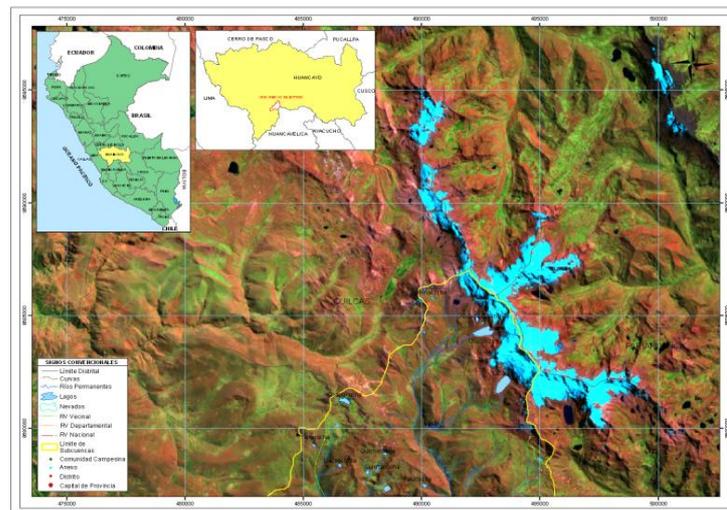


Figura 1. Área de estudio. Imagen Landsat-5 (R7G4B2). El área de estudio abarca la Cordillera Huaytapallana.

2. Metodología del trabajo

2.1 Datos

Los datos utilizados en este trabajo son las imágenes satelitales, las imágenes Landsat-5 que se han utilizado son el del sensor TM (Thematic Mapper) para calcular índice de vegetación (NDVI), índice de nieve (NDSI) y finalmente el área glaciara. Las imágenes son proporcionadas por la USGS y vienen con un nivel de ortorrectificación aceptable. Los datos escogidos comprenden los años 1985 hasta 2010. También se han considerado datos de estaciones pluviométricas proporcionadas por el servicio nacional de meteorología e

hidrología del Perú (SENAMHI). Los datos de precipitación nos permiten identificar la fecha de descarga de las imágenes.

Tabla 2. Datos imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5 (USGS, 2012) y precipitación (SENAMHI, 2012).

Imágenes Satélite LANDSAT				
Nº	Imagen	Sensor	Fecha de Adquisición	Precipitación (mm)
1	L50060681985163	TM	12 junio 1985	10,0
2	L50060681991228	TM	16 agosto 1991	0,0
3	L5006068_06819950608	TM	08 junio 1995	0,0
4	L5006068_06820010811	TM	11 agosto 2001	4,2
5	L5006068_06820040616	TM	16 junio 2004	13,4
6	L5006068_06820100617	TM	17 junio 2010	5,0

2.2 Fundamento físico

La reflectividad, es la variable fundamental cuyo cálculo permite aplicar otro tipo de técnicas para hacer investigación en ciencias de la Tierra. Es la parte de la irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre que se refleja de nuevo a la atmósfera. El modelo más sencillo utilizaría la ecuación de reflectividad como índice entre la radiación que parte del suelo $L_{sue,k}$ y la que llegó a éste procedente del Sol ($E_{sue,k}$) medida en la superficie del píxel (Chander y Markham, 2003).

$$\rho_k = \frac{\pi L_{sue,k}}{E_{o_{sue,k}}} \quad (1)$$

donde ρ_k es la reflectividad para el canal k , $L_{sue,k}$ es la radiancia que parte del suelo para el canal k y $E_{o_{sue,k}}$ la irradiancia solar para el canal k al nivel del suelo.

2.3 Cálculo de la superficie glaciaria a partir de Imágenes Landsat-5

Se ha aprovechado la característica de una alta reflectancia en el espectro visible junto con una fuerte absorción en el infrarrojo cercano/medio (canales 3 y 5, respectivamente). Ambas características son reunidas en un único parámetro, razón de canales o índice.

Así, los cocientes de los canales empleados han sido los siguientes Ariza (2006):

- $R_{35} = \frac{\rho(\lambda_{TM3})}{\rho(\lambda_{TM5})}$, donde $\rho(\lambda_{TM3})$ y $\rho(\lambda_{TM5})$ son las reflectancias en los canales 3 y 5 de las imágenes Landsat-5, respectivamente.
- Índice de nieve de diferencia normalizada, $NDSI = \frac{\rho(\lambda_{TM2}) - \rho(\lambda_{TM5})}{\rho(\lambda_{TM2}) + \rho(\lambda_{TM5})}$.

En los dos casos se aplicó a la imagen un umbral con la intención de obtener un vector para utilizarla sobre la imagen original.

Método A: Cociente de canales

Si se considera el umbral $\rho(\lambda_{TM3})/\rho(\lambda_{TM5}) > 1.3$, para nieve/hielo y si además se cumple (Maestro y Recio, 2004):

- $R(\rho(\lambda_{TM3})/\rho(\lambda_{TM5})) > 0.48$, se considera que es nieve.
- $R(\rho(\lambda_{TM3})/\rho(\lambda_{TM5}))$ entre 0,32 y 0,48 se considera que es nieve envejecida (*firn*).
- $R(\rho(\lambda_{TM3})/\rho(\lambda_{TM5})) < 0.32$ se considera que es hielo.

Considerar que la reflectancia de la nieve disminuye con el tiempo. Mientras que una nieve reciente puede alcanzar fácilmente valores de reflectancia superior al 80%, ésta puede caer por debajo del 40% tras la metamorfosis sufrida por los cristales de nieve con el tiempo. Esta caída de la reflectancia resulta mucho más marcada para el infrarrojo medio, haciendo el cociente entre este canal (canal 5) y cualquiera de las visibles.

Método B: Índice de nieve NDSI (enmascaramiento a partir del umbral)

La propiedad óptica más importante del hielo y del agua, que causa una variación espectral en la reflectancia de la nieve y de las nubes en las longitudes de onda del infrarrojo medio y el visible es que el coeficiente de absorción de ambas varía en 7 órdenes de magnitud entre 0,4 μm y 2,5 μm (Cano & Moreno, 1996). Es por esto que, en el canal 2 para imágenes Landsat-5, la nieve es más brillante que cualquier otra superficie natural, mientras que en el canal 5 la reflectancia de las nubes sigue siendo muy alta, cayendo a valores próximos a cero para la nieve. Por lo tanto, un índice de nieve normalizado, es de la siguiente manera

$$NDSI_{Landsat} = \frac{\rho(\lambda_{TM2}) - \rho(\lambda_{TM5})}{\rho(\lambda_{TM2}) + \rho(\lambda_{TM5})} \quad (3)$$

Y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es,

$$NDVI = \frac{\rho(\lambda_{NIR}) - \rho(\lambda_{red})}{\rho(\lambda_{NIR}) + \rho(\lambda_{red})} \quad (4)$$

donde $\rho(\lambda_{red})$ y $\rho(\lambda_{NIR})$ son las reflectancias en los canales rojos e infrarrojo cercano respectivamente (Chen *et al.*, 2005).

Luego, hacemos la discriminación entre nieve, suelo, roca y la cobertura de nubes. Para ello, consideramos que los valores de NDSI para nieve están entre 0,52 y 1 y los valores de NDVI están entre -0,2 y 0,2 (Figura 2) (Silverio *et Jaquet*, 2005).

3. Resultados y discusión

3.1 Área glaciár del nevado Huaytapallana

El índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) han permitido la delimitación del área glaciár. Los valores del área glaciár a partir del NDSI van desde 0,52 a 1 y de NDVI -0,2 a 0,2 (Figura 2) y estos permiten discriminar de otras superficies (Silverio *et Jaquet*, 2005).

El área glaciár del nevado Huaytapallana ha disminuido considerablemente desde el año 1985 hasta el año 2010 (Figura 4), en ese periodo se identifica una pérdida de 14,4 km² (que representa el 51,6% con respecto al año 1985).

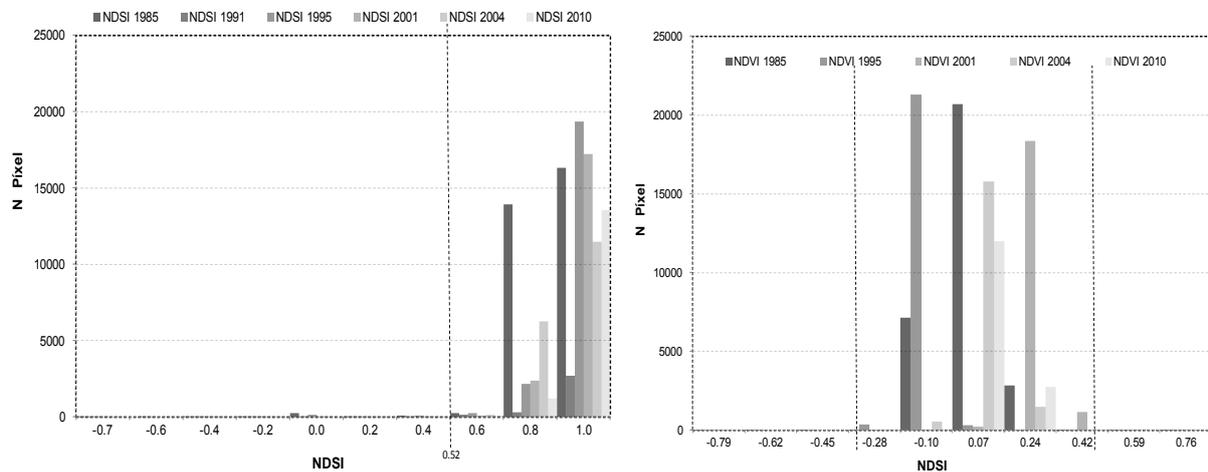


Figura 2. Histograma de NDSI (0,52 a 1,0) y NDVI (-0,2 a 0,2) correspondiente a los glaciáres para el periodo 1985 - 2010.

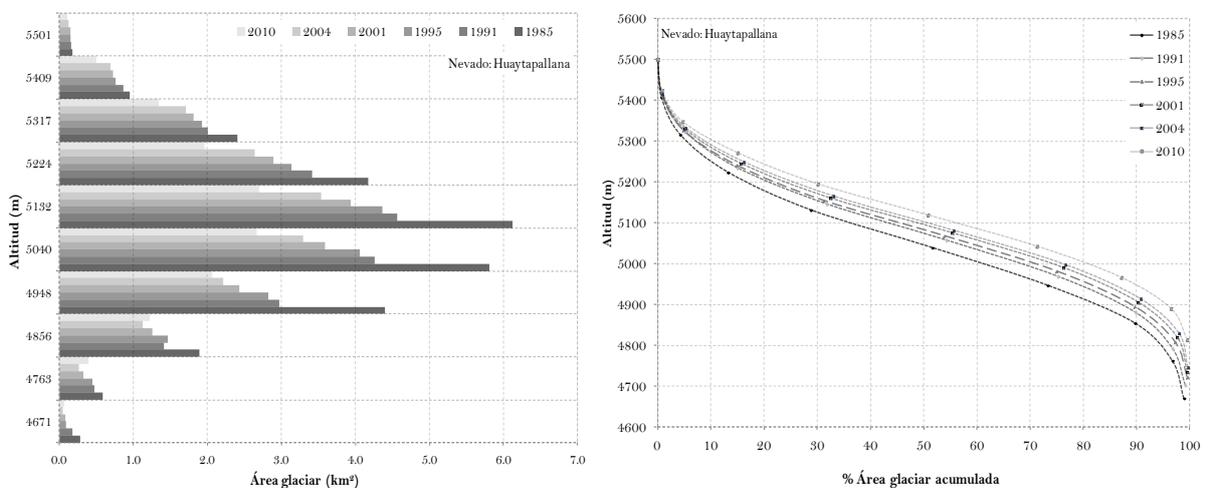


Figura 3. Área glaciár por rango altitudinal (izquierda) e hipsometría glaciár (derecha).

Analizando el área glaciaria por rango altitudinal y la hipsometría glaciaria (Figura 3) generados con el modelo de elevación digital *GDEM ASTER* con 30 m de resolución espacial (Wist, 2012), vemos que en altitudes más bajas (zona de ablación), la pérdida de área glaciaria es más notorio. En altitudes medias donde se presenta la mayor acumulación del área glaciaria, podemos identificar una reducción en aproximadamente 50% de área glaciaria con respecto al área glaciaria existente en el año 1985 tomando como referencia el año 2010. Y, en las altitudes más altas (zona de acumulación) el área glaciaria es casi constante.

Otra forma de expresar la pérdida de área glaciaria en el nevado Huaytapallana es analizándola estadísticamente (Figura 5), el alto coeficiente de determinación ($r^2=0,9$) nos indica que el área glaciaria ha disminuido en el periodo 1985-2010 y sigue esa tendencia el glaciario desaparecerá.

A partir de las imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5 se identifica un área glaciaria de 27,7 km² en el año 1985 y 13,4 km² en el año 2010 (Figura 4).

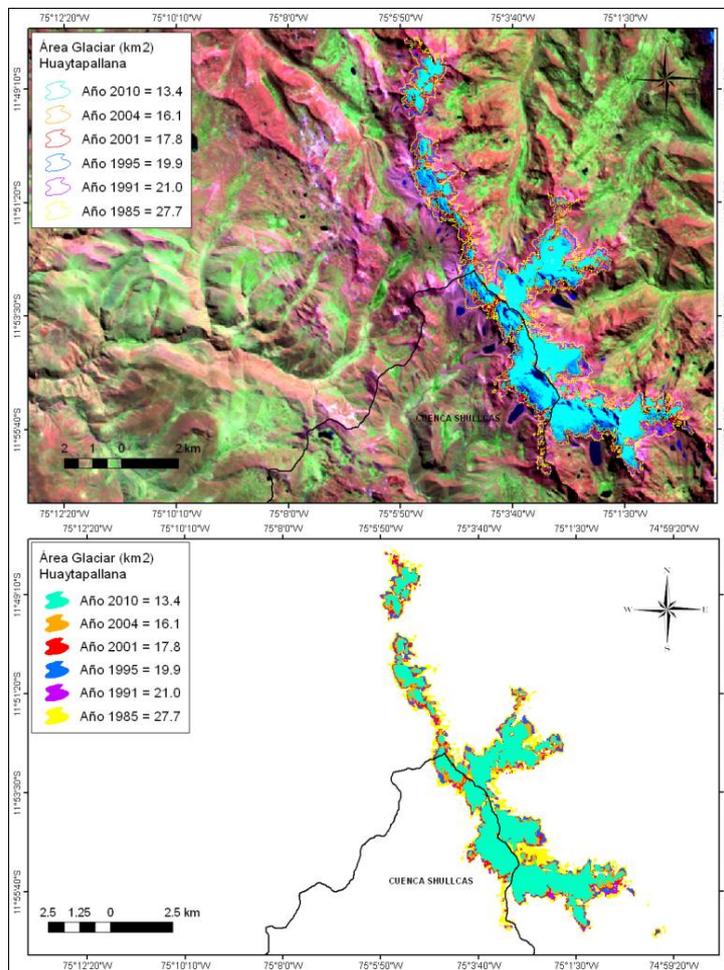


Figura 4. Retroceso del área glaciaria del nevado Huaytapallana (1985 – 2010).

Si analizamos la ecuación lineal en la Figura 5, donde la variable dependiente es el área glaciaria, definimos una tasa de reducción de 0,52 km²/año y esto, nos permite identificar una reducción de área glaciaria de 13,52 km² en 26 años y si se mantienen las mismas condiciones

atmosféricas a esa tasa de reducción el nevado Huaytapallana puede desaparecer entre los años 2034-2039.

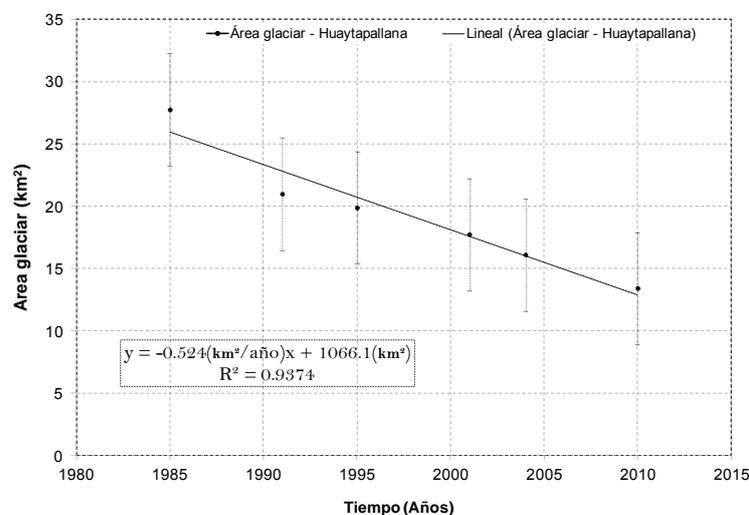


Figura 5. Distribución temporal del área glaciar del nevado Huaytapallana.

4. Conclusiones

Las condiciones climáticas actuales de los Andes Tropicales están evidenciando un retroceso acelerado de los glaciares y estos se han medido utilizando imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5 con una resolución de píxel de 30 m, permitiendo realizar un análisis en un intervalo de tiempo de 1985 a 2010 para el nevado Huaytapallana. Identificándose una reducción de 13,52 km² (48,4%) en 26 años a una tasa de retroceso de 0,52 km²/año.

El NDSI y NDVI que se obtienen de la imagen Landsat-5 permiten delimitar la cobertura glaciar, discriminando de otras coberturas como agua, suelo, vegetación, entre otros. También, a partir de la hipsometría glaciar generado de los modelos de elevación digital, podemos identificar el desplazamiento de la zona de ablación hacia regiones más elevadas de la montaña.

Agradecimientos

Los agradecimientos al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) por permitir publicar un trabajo realizado en el Proyecto de Adaptación al Cambio Climático del Retroceso Acelerado de los Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), a la USGS EROS por los datos imágenes del sensor TM del Satélite Landsat-5 y a la NASA por la disposición de los modelos de elevación digital *GDEM ASTER*.

Referencia bibliográfica

Ariza A. (2006). Análisis del retroceso de glaciares tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. Revista Cartográfica; Jan - Dec; 82; Pro Quest Science Journals, p. 65-67.

Cano A. y Moreno V. (1996). Análisis multitemporal de imágenes Landsat TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica. (en línea). Revista de Teledetección: p.1-12. Consultado 2 jul. 2009. Disponible en http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista_07/AET7_4.pdf.

Chander G. y Markham B. (2003). Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 41, N° 11, p. 2674-2676.

Chen X., Vierling L., Deering D. y Conley A. (2005). Monitoring boreal forest leaf area index across a Siberian burn chronosequence: a MODIS validation study. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, N° 24, p. 5435-5436.

Maestro C. y Recio J. (2004). Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat. *GeoFocus (Artículos)*, N° 4, ISSN: 1578- 5157, p. 79-92.

Silverio W. et Jaquet J. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 95. Vol. 342-350.

USGS (2012). Earth Resources Observation and Science Center (en línea). Consultado 5 may. 2009. Disponible en <http://glovis.usgs.gov/>

Wist (2012). ASTER global digital elevation model V001 (ASTGTM) (en línea). Consultado 5 ene. 2010 en <https://wist.echo.nasa.gov/api/>.