

Estimación del Cambio de Volumen del Glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a Partir de Datos de Satélite en el Periodo 2000-2010

Juvenal Tordocillo Puchuc¹, Joel Rojas Acuña²

¹Universidad Nacional del Callao, Av. Juan Pablo II s/n Callao 2, Perú.

^{1,2} Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap. Postal 14-0149. Lima, Perú.

RESUMEN

Se ha estimado, el cambio de área y volumen glaciar empleando las herramientas de la teledetección, basado en el procesamiento e interpretación de las imágenes adquiridas de los sensor ASTER a bordo del satélite TERRA, siendo el área de estudio el Glaciar Champará, el periodo de estudio comprende de 2000 - 2010.

La metodología utilizada para la estimación del área superficial del glaciar se utilizó el Índice de Diferencia Normalizada de la Nieve (NDSI) y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI), que sirve para eliminar agua pro glaciar que inicialmente se considera como glaciar. En base a ésta metodología se observa, una variación paulatina del área del Glaciar Champará, el cual muestra una reducción del 64% desde 1975 a la actualidad. La tasa de cambio promedio para el periodo 2000-2010 es de 1.03km²/año.

La variación del cambio del volumen del glaciar para el periodo 2000-2010 del Glaciar Champará se determinó a partir de las ecuaciones empíricas propuestos por BARTH y MEIER, (1997) y los modelos de elevación digital generados de las imágenes ASTER de las bandas 3N y 3B.

Descriptores: Flujo Glaciar, Teledetección, Sensor ASTER, LANDSAT 5 TM, Glaciar Champará

ABSTRACT

It has been estimated, the change in glacier area and volume using remote sensing tools, based on the processing and interpretation of images acquired from the ASTER sensor aboard the Terra satellite, being, the study area the glacier Champará, the studio period covers 2000 to 2010. The methodology used to estimate the glacier's surface area was used Normalized Difference Index of Snow (NDSI) and the Index Normalized Difference Water (NDWI), which serves to remove water that initially pro glaciar ice is considered. Based on this methodology can be seen, a gradual variation of the Glacier area Champará, which shows a 64% reduction from 1975 to present. The average exchange rate for the period 2000-2010 is 1.03km²/año. The variation of the volume of the glacier for the period 2000-2010 the glacier Champará was determined from the empirical equations proposed by BARTH and MEIER, (1997) and digital elevation models generated from the ASTER image of the bands 3N and 3B.

Keywords: Glacier flow, Remote Sensing, Sensor ASTER, LANDSAT 5 TM, Glacier Champará

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, el retroceso de los glaciares a nivel mundial se ha venido acelerando. Debido a que los glaciares se encuentran a temperaturas próximas a la temperatura de fusión bajo las condiciones terrestres actuales, se puede

decir, que los sistemas de transporte del hielo están relacionados con el cambio climático, [5].

La degradación y retroceso glaciar de las masas de hielo del planeta debido a los efectos del cambio climático y las intervenciones directas e indirectas de los proyectos productivos generados en las zonas de influencia ha suscitado la preocupación científica y ciudadana por el futuro de los glaciares, [9].

Si, bien el retroceso de los glaciares, es solo una manifestación más de los efectos del cambio climático, el Perú corre el riesgo de verse severamente afectada su economía en los próximos años a consecuencia de los impactos asociados al retroceso glaciar, [1]. También repercutirá sobre el suministro de agua de las grandes ciudades, y sobre los ecosistemas sensibles de alta montaña. Por ello, es necesario un conocimiento oportuno de las variables físicas para su prevención. La gran diferencia en la reflectancia de la nieve fresca caída y el hielo glaciar, [7] y [8]; nos permite hacer uso de imágenes satelitales para su clasificación, en ese contexto las técnicas de teledetección juegan un rol muy importante para el estudio de los glaciares.

El objetivo del estudio es estimar el área y el cambio de volumen del glaciar haciendo uso de la información de las imágenes satelitales, para nevados de poca extensión, como es caso Nevado Champará.

El área de estudio se localiza en el Nevado de Champará, entre las coordenadas de latitud ($8^{\circ}37' - 8^{\circ}43'$) Sur y entre las longitudes ($77^{\circ}45' - 77^{\circ}49'$) Oeste, con una altitud de 5735msnm, ubicado en la Cordillera Blanca, entre los distritos de La Pampa y Cusca que pertenecen a la Provincia de Corongo y el distrito de Yuracmarca que pertenece a la provincia de Huaylas, Departamento Ancash en Perú, [1] y [6].

internet: <http://glovis.usgs.gov/> y las imágenes Landsat 5 TM, Landsat ETM+, estas últimas imágenes se obtuvieron de forma gratuita.

Tabla 1. Datos Adquiridos, del área de Champará

FECHA	HORA	SUN AZIMUTH	SUN ELEVATION	SENSOR
1975-08-04	14:35:17	56.77024	42.56524	LANDSAT
2000-06-03	15:49:05	35.52257	54.56822	ASTER
2001-06-14	15:05:55	42.76230	46.02496	LANDSAT
2003-06-11	15:40:11	34.22150	51.11036	ASTER
2006-07-21	15:39:40	39.13334	52.30366	ASTER
2007-08-25	15:40:12	50.01810	59.72346	ASTER
2009-07-29	15:40:12	41.09912	53.52707	ASTER
2010-05-29	15:40:00	35.20053	52.61038	ASTER

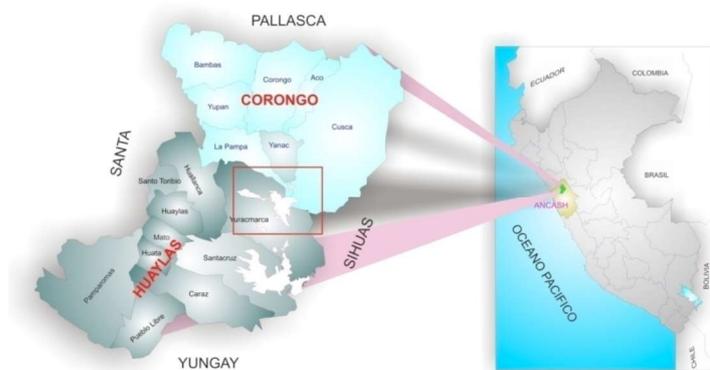


Figura 1. Ubicación del Nevado Champará en la región Ancash-Perú

Disponibilidad y Adquisición de la Información Satelital

Todas las imágenes están en el Nivel 1A, la imagen ASTER 11/06/2003, es adquirida del proyecto de LABTEL (UNMSM) y las demás imágenes ASTER han sido adquiridas, por los autores con Path/Row 8/66 y en formato HDF. Portal de descarga por

METODOLOGIA

Para la corrección geométrica de las imágenes LANDSAT TM, ETM+ y ASTER se generó un MED (Modelo de Elevación Digital), a partir de las curvas de nivel de las cartas de 1/100 000 del IGN, estas curvas de nivel datan de los años 1999 y 2000. El método de corrección aplicado es la denominada imagen a imagen, el cual utiliza como base una imagen de referencia y un conjunto de puntos de control (GCP) para el proceso de la orthorectificación de las imágenes. Una vez extraída los metadatos de la imagen, se procedió hacer la conversión de Número Digital a valores de radiancia, para tal fin, se elaboró un código en IDL 7.0 [3], para comparar imágenes de distintas fechas es ventajoso transformar los valores de radiancia a reflectancia, siguiendo las recomendaciones CHANDER Y MARKHAM, [4].

Las correcciones atmosféricas de las imágenes se realizaron mediante las rutinas incorporadas del programa ENVI 4.5, llamada FLAASH. Antes de aplicar la rutina FLAASH a las imágenes LANDSAT TM, ETM+ y ASTER, se consideró que debido a la latitud en la que se ubica, el modelo de atmósfera que maneja FLAASH el cual representa de la mejor forma las condiciones climáticas y radiativas en el

lugar, es una atmósfera *subartic summer*. Por otro lado, dada la lejanía de éste Nevado de las ciudades, implica que el modelo de aerosoles que se debe emplear, es de la zona rural. Otros parámetros que la subrutina FLAASH emplea, como la posición geográfica del centro de la imagen, el tipo de sensor, la altitud del sensor, la elevación, el tamaño del pixel, así como la fecha y hora de la imagen; fueron obtenidos del metadato ASTER. Posteriormente, es necesario dividir por un factor de escala de 10 de tal forma que se obtengan de dicha transformación en unidades ($mW/cm^2 \mu m sr$) coincidan con las unidades que manejan los procesos de la subrutina FLAASH ($\mu W/cm^2 nmsr$).

La topografía del terreno sobre la iluminación del mismo, causa una fuerte variación en la respuesta espectral de tipos de cubiertas similares, las cubiertas en zonas sombreadas muestran una reflectividad menor de la esperada, mientras que en zonas soleadas el efecto es contrario. Por tanto, el proceso de normalización topográfica es crítico en áreas de terreno abrupto o montañoso como es el caso del Nevado Champará. Actualmente existe un amplio rango de algoritmos para la corrección topográfica, entre los cuales, se ha optado por el método Corrección-C.

Estimación de la superficie glaciar

La nieve y el hielo tienen una alta reflectancia en el espectro VNIR mientras que para $\lambda > 1.5 \mu m$ tiene muy baja reflexión. Así que la imagen que relaciona dos bandas espectrales con diferentes reflectancias de la nieve y el hielo, permite la segmentación de acuerdo a las propiedades espectrales.

La relación de Landsat 5 TM, Band4/Band5, muestra, buenos resultados para la segmentación de los glaciares y para las imágenes ASTER la relación Band3/ Band4. La clasificación de Nieve por NDSI se puede utilizar para el mapeo de la zona cubierta de nieve y hielo en un glaciar, se calcula para TM y ETM+ de acuerdo a la relación, $(Band2 - Band5) / (Band2 + Band5)$, [5] y [6].

Para controlar lagos pro glaciar, se hace uso del índice normalización del agua (NDWI). Se calcula utilizando las bandas de Landsat según, $(Band1 - Band4) / (Band1 + Band4)$. Para la imagen ASTER se calcula según $(Band2 - Band3) / (Band2 + Band3)$. Luego, el NDSI, se le ha restado el NDWI para obtener la máscara del glaciar. Otra opción, que se tuvo en cuenta es el NDVI y teniendo en cuenta, lo propuesto por [5], el $NDVI < 0.4$, representa agua, entonces esta cantidad se resta al NDSI para eliminar así, de esta manera cuerpos de agua pro

glaciar, que un primer momento se puede considerar como glaciar.

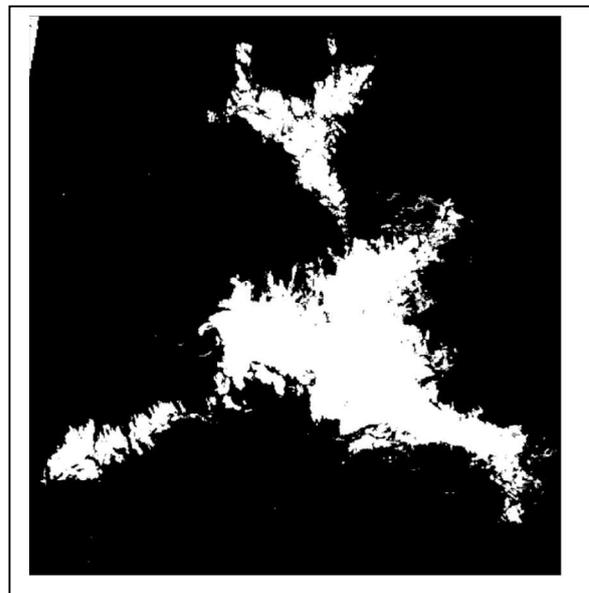
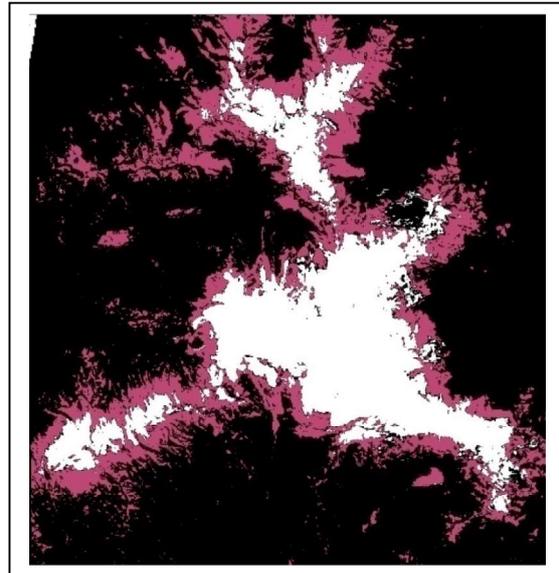


Figura 2. Imagen ASTER 03/06/2000, En la parte superior la máscara del área glaciar es a partir de la clasificación supervisada SAM, glaciar blanco y granito marrón. En la parte inferior la máscara es a partir del NDSI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso de las imágenes de la familia LANDSAT y ASTER en combinación con los modelos digitales de elevación, generados a partir de las curvas de nivel

del IGN, permitieron obtener los cambios en el área glaciar del Nevado Champará, además de los cambios en la cobertura y extensión del glaciar a través del tiempo.

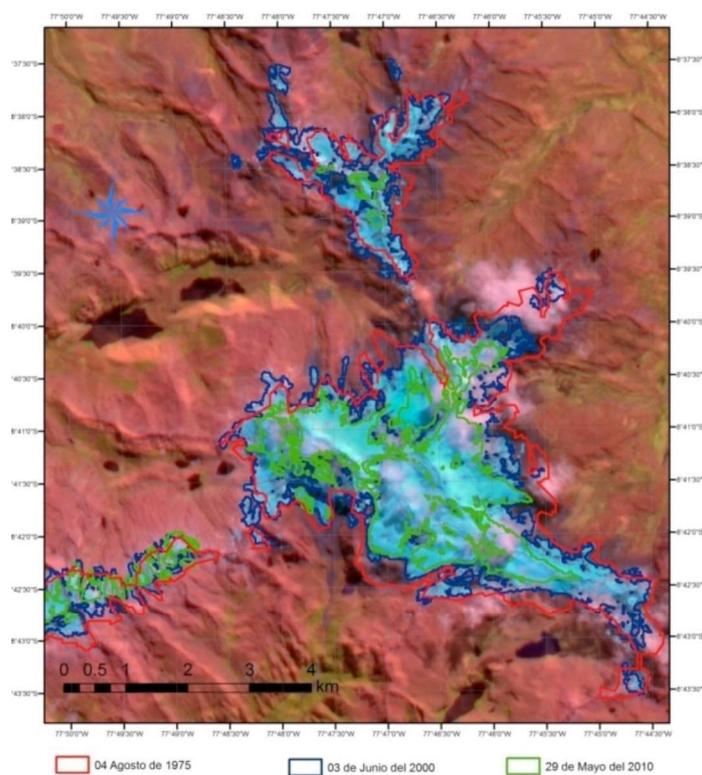


Figura 3: Imagen ASTER 03/06/2000 de fondo con combinación de bandas RGB 432 y Delimitación automática de vectores.

En la Figura 4, Las áreas del Nevado Champará a partir de imágenes ASTER y Landsat, podemos visualizar el porcentaje de cambio entre 1975, 2000 y 2010. Donde se observa claramente una reducción considerable, en el área podemos notar los bordes glaciares que se encuentran en menor altitud, son afectados en mayor proporción. Como se observa en los vectores de la Figura 4.

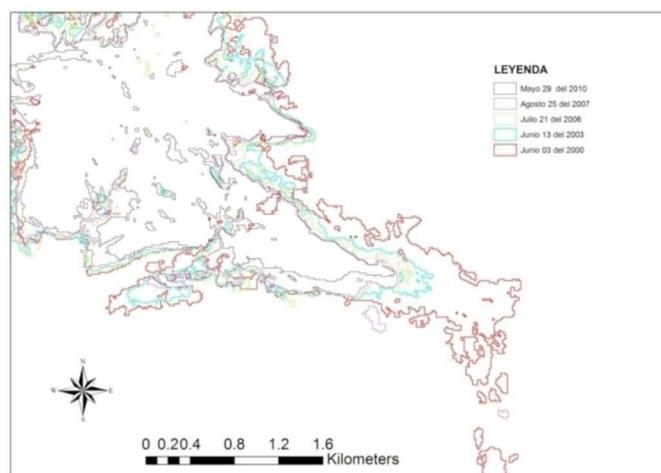


Figura 4: Extremo del glaciar, que disminuye con mayor rapidez.

Tabla 2. Parámetros Físicos como Área y volumen obtenido de las imágenes del Nevado Champará

Fecha	Área glaciar (Km ²)	Volumen (Km ³)
1975-08-09 MSS	23.5044	2.9089
1987-05-31 TM	10.6756	1.0426
2000-06-03 ASTER	17.268	1.9483
2001-06-14 ETM+	14.524	1.5557
2003-06-11 ASTER	12.0917	1.2259
2006-07-21 ASTER	10.598	1.0328
2007-08-25 ASTER	8.8413	0.8160
2009-07-29 ASTER	8.7625	0.8065
2010-05-29 ASTER	8.5644	0.7829

Para la estimación del volumen glaciar se ha utilizado una relación empírica propuesta por [2], que dicha fórmula empírica es válida para 160 glaciares de los Alpes. Como se sabe, se considera el volumen de un glaciar proporcional a la longitud, ancho y el promedio de su espesor ($V = cS^{\gamma}$), c es un parámetro lineal ($c=0.048$) el rango de valores para γ varía entre 1.25 para glaciares polares y 1.35, para glaciares de valles como los Alpes Suizos para zona en que nos encontramos en nuestro estudio se optó, por tomar un promedio 1.30.

En base al procesamiento de las imágenes ASTER para el periodo 2000-2010, se observa una disminución paulatina del área del Nevado, el cual muestra una reducción considerable de su superficie, una reducción aproximada del 62% desde 1975. Por lo observado la línea de tendencia que sigue en la reducción de su área del Nevado Champará es exponencial, por presentar una menor correlación frente al ajuste lineal, por lo que podemos estimar que el nevado se reducirá en un 95% del estado actual en aproximadamente 35 años, Aunque dada la presencia de otros factores climatológicos esto puede tener a una exponencial de mayor pendiente sin embargo resulta complicado proyectar el tiempo de vida del glaciar.

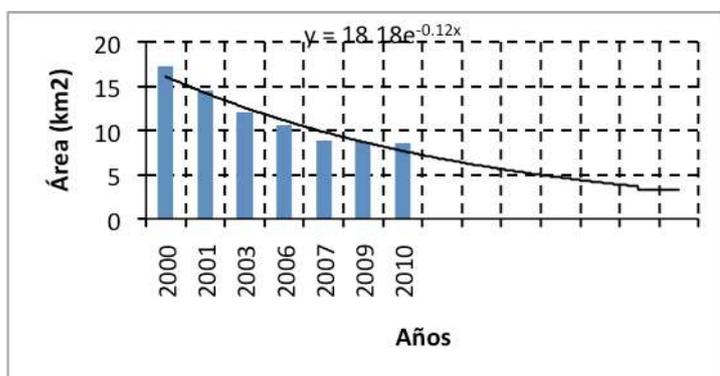


Figura 5: La tendencia temporal de la reducción del área, a partir del sensor ASTER.

Tabla 3: Registro del área glacial del Nevado Champará. El porcentaje respecto al año 2000 representa la fracción de superficie glacial restante respecto al 2000.

Fecha	Área glacial (Km ²)	Nº de Días	Diferencia (km ²)	Tasa de Cambio (km ² /año)	% Respecto al año 2000
2000-06-03 ASTER	17.268	--	--	--	--
2001-06-14 ETM+	14.524	379	-2.744	2.6426	16.0
2003-06-11 ASTER	12.0917	727	-2.4323	1.2211	30.0
2006-07-21 ASTER	10.598	1136	-1.4937	0.4799	39.0
2007-08-25 ASTER	8.8413	400	-1.7567	1.6029	39.0
2009-07-29 ASTER	8.7625	704	-0.0788	0.0408	50.0
2010-05-29 ASTER	8.5644	304	-0.1981	0.2378	51.0

En la Tabla 3, podemos observar la tasa de cambio del área glacial en el 2001 experimentó una reducción del 16% (2.744 km²) respecto al área calculada para el año 2000, mientras que, para el año 2003 está disminuyó en un 30% (2.4323 m²), para el año 2006, el área cubierta por el glaciar resulta ser sólo un 39% del área de referencia y entre los años 2007, 2009 y 2010 se observa una reducción aproximada de un 50%.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado que la Teledetección es una herramienta muy útil para hallar variaciones de superficies glaciares y hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de los parámetros

físicos, lo cual la metodología utilizada es factible en glaciares de poca extensión y dicha metodología debe ser aplicable a otros glaciares Peruanos.

El estudio realizado con las imágenes ASTER en el periodo 2000-2010 muestra claramente una disminución en el área glaciaria en 10 años cerca de un 50%, es decir el proceso es notable en los últimos 35 años.

Los modelos de elevación digital generados a partir de las imágenes ASTER han sido comparados con los modelos obtenidos a partir de datos topográficos del Instituto Geográfico Nacional del Perú. Si bien estos modelos no tienen la calidad absoluta deseable, pues no se han generado con el apoyo de los puntos de control necesarios y la mejora de la calidad depende de los datos de puntos de control y datos GPS.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Dr. Joel Rojas Acuña y al Laboratorio de Teledetección (LABTEL) de la UNMSM.

REFERENCIAS

- [1] AMES A. (1989). Inventario de glaciares del Perú, 105pag., Hidrandina S.A., Huaraz: Unidad de Glaciología e hidrología, Perú.
- [2] Barht D. y M. Meier. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling, *Journal Geophysical Research* Vol, 102, N° B9 Pages,20 355-362 Sep, 10.
- [3] CANTY MORTON J., (2006). *Image Analysis, Classification and Change detection in Remote Sensing*, for algorithm for ENVI/IDL, Taylor &

Francis group.

- [4] Chander Gyanesh y Markham Brian L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment* 113 (2009) 893–903.
- [5] Kaab, A. (2005). Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. *Physical Geography Series*, 48, University of Zurich.
- [6] KASER G. y CH. GEORGES, (1999). On the mass balance flow latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca, *Geogr. Ann.*, 81 A(4): 643-651.
- [7] LIOU K. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Second Edition, International Geophysics Series Volume 84, Academic Press, Elsevier Science (USA), page 583.
- [8] LUTHI M.y FUNK M. (2006). *Physics of Glaciers I*, Gornergletscher, Switzerland, June 2006, page 110.
- [9] PAUL F. y C. HUGGEL, (2004). Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers, *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow*, Dresden/FRG, June 16 – 17.

E-mail: juv_thor157@hotmail.com