



Cuenca hidrográfica del río Quillcay

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL SECTOR SUR DEL PARQUE NACIONAL HUASCARÁN UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR TM LANDSAT 5¹

Mauro Palomino Espinoza

RESUMEN

Los cambios climáticos y el calentamiento global están produciendo serios impactos en la naturaleza como el deshielo acelerado de los glaciares de montaña. En el Perú, desde 1970, se ha perdido cerca del 22% de la superficie de los glaciares. Ese deshielo puede afectar seriamente las actividades socioeconómicas de los países que dependen del agua para el consumo y para la producción de energía. Además, el deshielo también puede contribuir en la ocurrencia de desastres naturales, desencadenados por flujos de detritos, avalanchas e inundaciones como los ya ocurridos en el valle del río Santa, en la región centro-norte del Perú. Estos desastres dejaron decenas de millares de muertos y ciudades muy destruidas.

Por lo tanto, es imprescindible que se realice un monitoreo del deshielo de los glaciares para que pueda ser utilizado como información de base para la adopción de medidas preventivas. La mayoría de monitoreos han sido realizados tradicionalmente con informaciones de campo que presentan una serie de obstáculos para coleccionar datos. Por ello, actualmente se procura utilizar geotecnologías para mejorar y facilitar la realización del seguimiento a este proceso.

El uso de imágenes de satélite para determinar el área de deshielo de los glaciares ha sido eficaz en los análisis multitemporales para extraer informaciones sobre la cobertura de nieve acumulada. En este contexto, se realizó el inventario del deshielo glaciar ocurrido en la subcuenca del río Quillcay, sector sur del Parque Nacional Huascarán (Perú), en el período

1988-2006, utilizando imágenes del sensor TM del satélite LANDSAT 5. En este estudio fueron utilizadas las imágenes del sensor TM (bandas 5, 4 y 3) referentes a los años 1988, 1997 y 2006, así como el Mosaico NASA Landsat ETM (bandas 7, 4, 2). Las imágenes fueron segmentadas y clasificadas utilizando el clasificador no-supervisado ISOSEG del SPRING. Los resultados obtenidos demostraron que está ocurriendo un deshielo acelerado de los glaciares en el Parque Nacional Huascarán. En el período de 1988 a 1997, el deshielo fue de 722, 26 ha, mientras que de 1997 a 2006 fue de 630,82 ha.

También verificamos que las áreas de las lagunas andinas han aumentado significativamente poniendo en riesgo la ciudad de Huaraz. Por ejemplo, la laguna Palcacocha incrementó su área en

¹ Adaptada a la lengua española del trabajo original en lengua portuguesa: "Análise multitemporal do sector sul do Nevado Huascarán, Peru, utilizando imagens do sensor TM". Monografía de Especialização. XX CIRS-INPE, RS-Brasil 2007.

38,15 ha en el período 1988-2006, y la laguna Tullpacochoa creció en 30,93 ha. Es necesario adoptar medidas preventivas y mitigadoras con carácter de urgencia en la subcuenca del río Quillcay.

PALABRAS CLAVE: *deshielo glaciar, análisis multitemporal, percepción remota, Parque Nacional Huascarán, cambios climáticos.*

DATOS DEL AUTOR

Doctorando en Educación Ambiental, con Maestría en Geografía: Gestión y ordenamiento territorial, Especialista en Sensores Remotos y Sig. Docente Universitario, Consultor en Geotecnologías y procesamiento de imágenes de satélite con experiencia en desarrollo de capacidades y en la formulación participativa de planes de O. T., Planes Estratégicos de Desarrollo, a nivel distrital y de subcuenca, con conocimientos de gestión municipal, análisis del riesgo y manejo de SIG, PDI, con fines de ordenamiento territorial. Con una sólida formación, práctica y aplicada. Experiencia en capacitación y manejo de software SIG libre, experiencia en la aplicación de la Percepción Remota en seguridad física, riesgos y vulnerabilidad, ordenamiento territorial y monitoreo de recursos naturales.

geomauro20@gmail.com

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

TITLE

Multitemporal analysis from Sector South of Huascarán National Park, using images of sensor TM Landsat 5

ABSTRACT

The climatic changes and the global heating have produced serious impacts in the nature, as the sped-up thawing of mountain glaciers. In Peru, since 1970, he was lost about 22% of the surface of glaciers. This thawing can seriously affect the partner-economic activities of the countries that depend on the water for the consumption and the production of energy. Moreover, the thawing also can contribute for the occurrence of natural disasters, unchained for flows of debris, avalanches and floods, as already occurred in the Valley of the Santa River, in the region north of Peru. These disasters had left sets of ten of dead thousands of and cities completely destroyed. Therefore, it is essential that if it carries through a monitoring of the thawing of glaciers so that can be used as information of base for the adoption of writs of prevention. The majority of the monitoring has been carried through traditionally with field information, that present a series of obstacles for the collection of the data.

Of this form, currently if it has searched to use the geotechnologies to improve and to facilitated the accomplishment of the monitoring. The use of images of satellite to determine the area of thawing of glaciers if has shown efficient in the multitemporal analyses, in order to extract information on the accumulated snow cover. In this context, if it carried through I inventory it of the thawing glacier occurred in the basin of the Quillcay river, south sector of the Huascarán National Park (Peruvian), in period 1988-2006, using images of sensor TM of satellite LANDSAT 5. In this study the images of sensor TM (bands 5, 4 and 3) referring to the years of 1988 had been used, 1997 and 2006, as well as the Mosaic NASA Landsat ETM (bands 7,

4, 2). The images had been segmented and classified using not-supervised classifier ISOSEG. The gotten results had demonstrated that a sped-up thawing of glaciers in the Huascarán Snowed is occurring. In the period of

1988 the 1997 the thawing was of 722, 26 ha, while that of 1997 the 2006 ha was of 630,82. Also it was verified that the areas of the Andean lakes have increased significantly, placing in risk the city of Huaraz. For example, the Palcacocha lake increased its area in 38,15 ha in period 1988-2006, and the Tullpacocha lake increased its area in 30,93 ha. Is necessary the adoption of writs of prevention and mitigating in character of urgency in the basin of the Quillcay river.

KEYWORDS: *glacier regression, multitemporal analysis, remote sensing, Huascarán Snowed, climate changes.*

© This article is of open access to the public and subject to the Creative Commons Attribution Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. The commercial use of this original work and the production of derived works from this article is not allowed. For more information, please visit: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

I. INTRODUCCIÓN

Los glaciares, especialmente los tropicales, son excelentes indicadores de la evolución del clima y constituyen las principales reservas sólidas de agua dulce en el globo. Con el deshielo acelerado de los glaciares, diversas ciudades y comunidades que dependen de este recurso pasan a sufrir serias consecuencias socioeconómicas, lo que limitará significativamente el desarrollo local. Además de ofrecer agua potable para el consumo en las ciudades y la agricultura, el deshielo de los glaciares tropicales también permite generar energía, a través de centrales hidroeléctricas, entre otros.

En América Latina, los glaciares tropicales se encuentran en su mayor parte en la cordillera de los Andes. El Perú tiene 71% de estos glaciares, los cuales están presentando un retroceso del 22% desde 1970. El deshielo acelerado amenaza captar agua y energía para la costa árida del país, donde moran dos tercios de la población peruana. El Quellcaya, considerada la mayor capa de hielo tropical del mundo, está perdiendo cerca de 60 m por año de acuerdo a los estudios realizados por Thompson, L. G. et al. (1984) y es probable que desaparezca en el 2020. El glaciar Pastoruri ya retrocedió 502 m, de acuerdo a las mediciones efectuadas de 1980 a 2006 (INRENA, 2007).

El Perú también se encuentra permanentemente expuesto al impacto de fenómenos naturales asociados al deshielo de los glaciares. Ese deshielo puede desencadenar serios desastres naturales, convirtiéndose en una gran amenaza para las poblaciones que viven en los valles próximos a los glaciares. Los desastres están asociados principalmente a la formación de nuevas lagunas glaciares (*glacial lakes*) que rompiéndose pueden generar grandes flujos de detritos (*debris flow*) e inundaciones bruscas (*flash flood*) en las áreas de fondo de valles. Las experiencias más significativas fueron registradas en el departamento de Ancash, localizado en la región centro-norte del Perú.

Un ejemplo fue el desborde de la laguna Palcacocha, en 1941, situada en la cordillera Blanca que provocó un flujo de detritos (*debris flow* o aluvión) que destruyó un tercio de la ciudad de Huaraz y causó la muerte de 5 000 personas. Las avalanchas ocurridas en el Parque Nacional Huascarán en 1970, desencadenaron grandes flujos de detritos y sepultaron las ciudades de Ranrahirca y Yungay donde murieron cerca de 22 000 personas (Ericksen y Plafker, 1970).

Para la prevención y mitigación de los desastres de origen glaciar es necesario realizar estudios glaciológicos como el inventario y monitoreo del derretimiento de los glaciares. A partir de esos levantamientos básicos es posible realizar medidas estructurales y no-estructurales como obras de ingeniería y mapeamiento de áreas de riesgo, respectivamente. La evaluación y monitoreo de los glaciares y lagunas glaciares han sido tradicionalmente realizadas con mediciones en campo. Sin embargo, son varios los problemas que dificultan la realización de este abordaje como el difícil acceso a los puntos de mediciones, el costo de la recogida de muestras, las inclemencias meteorológicas y, en algunos países, las políticas sensibles (ausencia de seguridad) que impiden la realización de las investigaciones. De esta forma, la teledetección se ha convertido en una de las principales herramientas para la evaluación del deshielo de los glaciares (Bishop et al., 2000; Dyurgerov, 2002; Kääb et al., 2003).

Una de las áreas en el Perú que actualmente está siendo monitoreada por la NASA es la laguna Palcacocha porque debido al deshielo que sufren los glaciares del Parque Nacional Huascarán podría nuevamente desencadenar un gran desastre en la región (NASA, 2007). El desbordamiento de la laguna podría desencadenar un peligroso flujo de detritos en el río Quillcay. Este río atraviesa el área urbana de la ciudad de Huaraz, donde está la mayor concentración poblacional del valle del río Santa, pudiendo ocurrir un desastre similar al ocurrido en Yungay en 1970. Por ello, se considera necesario analizar y monitorear el retroceso de los glaciares que están comprendidos en la subcuenca hidrográfica del río Quillcay como forma de entender el comportamiento de los mismos para el establecimiento de medidas preventivas.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Inventariar el deshielo glaciar ocurrido en la subcuenca del río Quillcay, sector sur del Parque Nacional Huascarán (Perú), en el período 1988-2006, utilizando imágenes de sensores ópticos (sensor TM del satélite LANDSAT 5).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los tipos de desastres ocurridos en la subcuenca hidrográfica del río Quillcay que pueden ser desencadenados por el deshielo de los glaciares. Seleccionar las mejores bandas para el monitoreamiento de los glaciares.
- Evaluar las técnicas de procesamiento digital de imágenes para delimitar los glaciares del sector sur del Parque Nacional Huascarán;

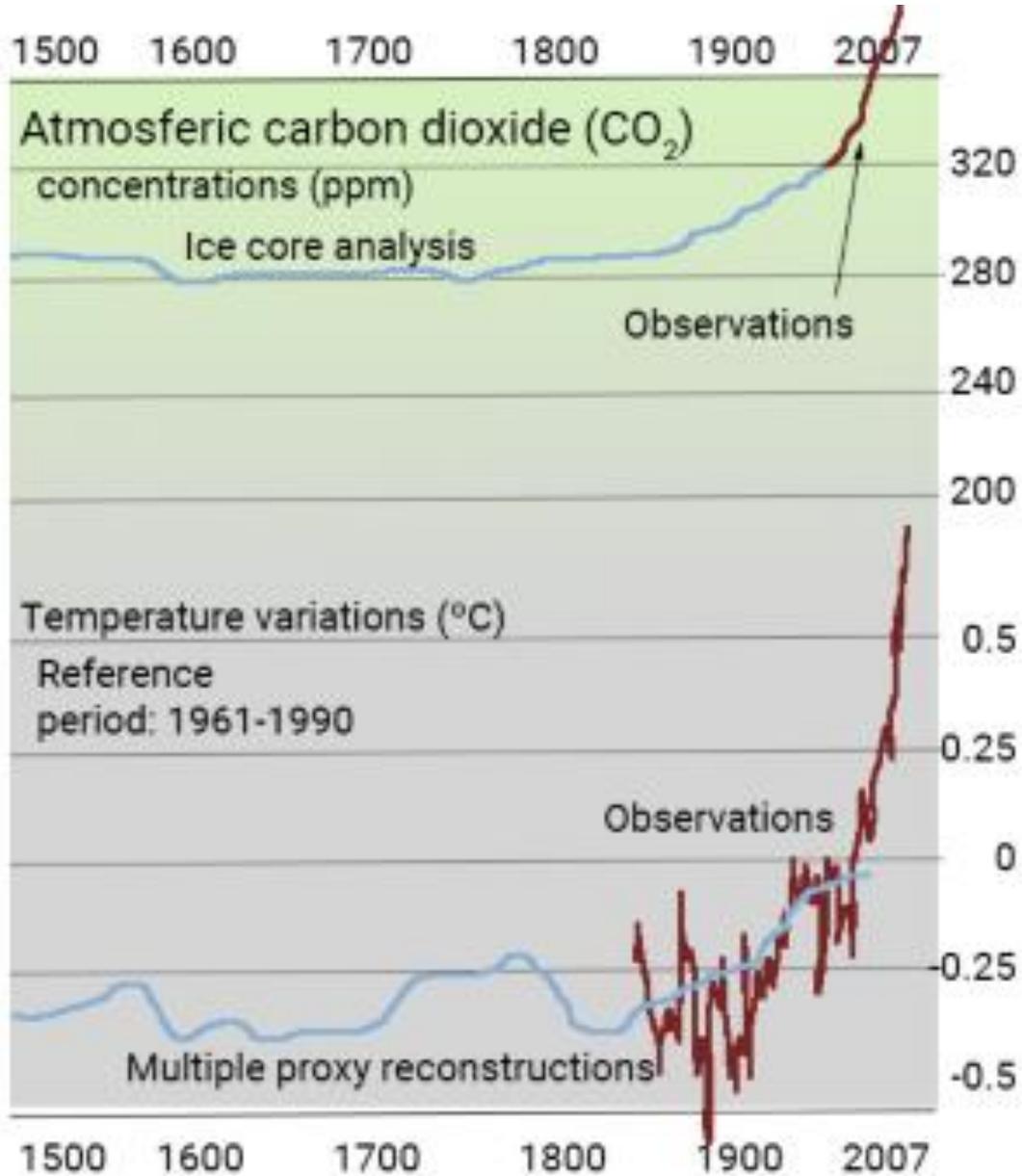
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 CALENTAMIENTO GLOBAL Y EL DESHIELO DE LOS GLACIARES

El calentamiento de la Tierra es el resultado del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones están asociadas principalmente al aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) que es liberado en la atmósfera por el uso de combustibles fósiles, como carbón y petróleo, así como por la quema de origen antrópico, realizadas junto con las deforestaciones.

El incremento de la temperatura media global en el siglo XX fue de aproximadamente 0,5°C, siendo el pronóstico para fines de este siglo de 1,5 a 5,8°C (IPCC, 2007). En la Figura 1, se observa la relación directa entre el incremento de CO₂ y la temperatura media global. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), la mayor parte del calentamiento global ocurrido en los últimos 50 años se atribuye a las actividades antrópicas, siendo que la tercera parte de las emisiones de CO₂ fueron producidas en las dos últimas décadas.

FIGURA 1.
Aumento de la temperatura y del CO₂ en los últimos siglos



Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), 2007.

Dentro de las alteraciones producidas en el ambiente, una de las más graves es el deshielo de los casquetes polares y de los glaciares de montaña. La figura 2 permite observar los glaciares que están perdiendo superficie en las últimas décadas. Abajo se citan, según UNEP (2007), los casos más severos:

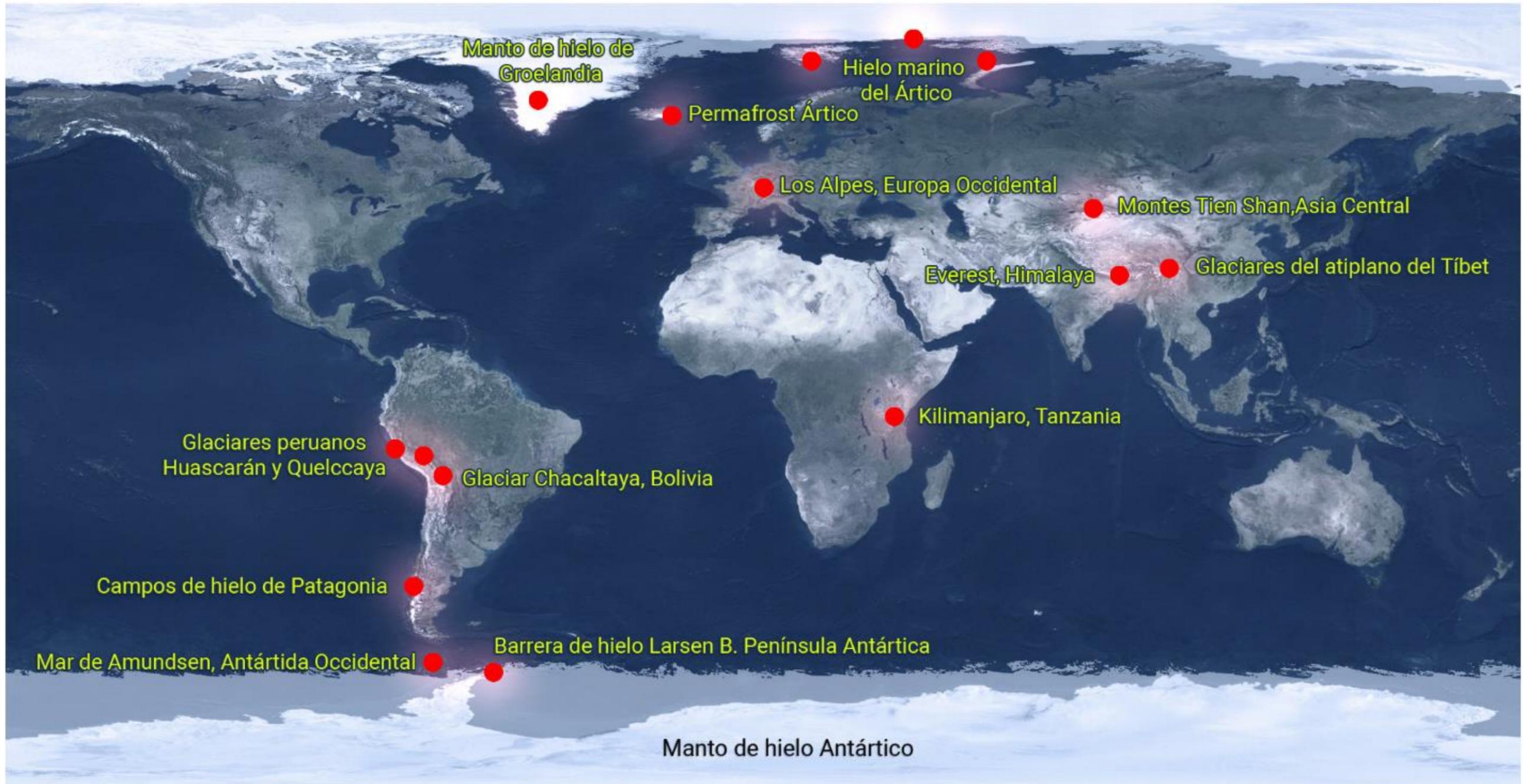
a. Hemisferio norte

- **El hielo marino del Ártico** está disminuyendo a un ritmo de 9 % a lo largo de las últimas décadas. Todo el hielo marino de verano podría desaparecer en este siglo.
- **El manto de hielo de Groenlandia**, la mayor masa de hielo del hemisferio norte está perdiendo hielo a un ritmo de 50 km³/año.
- **Los glaciares de los montes Tien Shan en Asia Central**, perdieron casi 1/3 de su superficie en la segunda mitad del Siglo XX, en una tasa de hasta 2 km³/año.
- **El permafrost ártico se calentó cerca de 2 °C desde la década de 80**. Con el deshielo del *permafrost* se liberarán grandes cantidades de metano y dióxido de carbono a la atmósfera, contribuyendo aún más al efecto invernadero.
- **Los glaciares del altiplano del Tíbet** constituyen la zona de hielo más extensa fuera de las regiones polares. Las tasas de deshielo de los 46 298 glaciares se elevaron en las últimas décadas, amenazando las reservas de agua en gran parte de Asia.
- **Los glaciares del Everest en el Himalaya** disminuyeron de 2 a 5 km en las últimas cinco décadas, causando el desborde de las lagunas glaciares y ocasionando inundaciones en las ciudades y comunidades próximas.
- **Los glaciares alpinos en Europa Occidental** disminuyeron sus glaciares un 5 % de su volumen desde 1970.

b. Hemisferio sur

- **El glaciar de Chacaltaya en Bolivia** perdió dos tercios de su masa solamente en los 90 y podría desaparecer hacia el 2010.
- **Los campos de hielo de la Patagonia** son las mayores masas de hielo del hemisferio sur, donde el derretimiento es el más acelerado del mundo. Este deshielo ha contribuido con más del 9 %, asociado a los glaciares de montaña, en la alteración del nivel de los océanos.
- **El Kilimanjaro en Tanzania** sufrió una reducción del 80 % de su área glacial en lo que vadel siglo XX.
- **El mar de Amundsen en la Antártida Occidental** recibe el 60 % de los glaciares que le van llegando, algo que podría elevar en 0,2 mm/ año los niveles de los océanos.
- **La barrera de hielo Larsen B en la península Antártica** y que tenía en 2002 una vasta superficie de 3 000 km² de hielo, se desintegró. Desde entonces, los glaciares locales se mueven más rápidamente, liberando mayor cantidad de hielo en el mar.

FIGURA 2:
Principales zonas en el globo donde ocurre el deshielo de los glaciares de montaña



Fuente: Adaptada del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), 2007.

3.2 IMPACTOS CAUSADOS POR EL DESHIELO DE LOS GLACIARES

Los glaciares, especialmente los tropicales, son excelentes indicadores de la evolución del clima y constituyen las principales reservas sólidas de agua dulce en el globo. Con el deshielo acelerado de los glaciares, diversas ciudades y comunidades que dependen de este recurso sufrirán serias consecuencias socioeconómicas.

En América del Sur, las áreas más significativas de glaciares experimentan un acelerado retroceso, especialmente los glaciares pequeños, que están desapareciendo casi en su totalidad. Ese deshielo genera flujos subsuperficiales que son retenidos en los diques naturales producidos por el desplazamiento de las morrenas formando pequeños reservorios de agua. Además de ese flujo continuo, también se produce el derretimiento de los bordes de los glaciares, aumentando el nivel de agua, que da origen al lago glaciar (Richardson, S.D. y Reynolds, J. M., 2000; Clague, J.J. y Evans, S.G., 2000).

El desborde del lago ocurre cuando no soporta el volumen de agua producido por el deshielo, causando el rompimiento del dique. Así, el material que forma el dique, sumado al gran volumen de agua, se desplaza pendiente abajo formando un violento flujo de detritos, cargado de rocha, barro, árboles, etc. (Richardson, S.D. y Reynolds, J. M., 2000).

Además, debido al ciclo hielo-deshielo, los suelos helados se fragmentan, contribuyendo al desplazamiento de las masas de hielo y consecuentemente a la fracturación de los glaciares (Alean, 1985). Cuando los bloques caen en las lagunas glaciares también pueden ocasionar un desbordamiento de las mismas. Así, además de los detritos asociados al rompimiento del dique, los flujos también pasan a contener hielo en su constitución (Richardson, S.D. y Reynolds, J. M., 2000).

Los flujos de detritos de origen glacial son súbitos y extremadamente violentos. Debido a las elevadas pendientes de la región andina, los flujos adquieren grandes velocidades (250-400 km/h), volviéndose prácticamente imposible la evacuación de la población que vive en las márgenes y planicies próximas a los ríos. (Plafker, G. y Ericksen, G. E. 1978).

3.3 DESASTRES NATURALES

Los desastres naturales se conciben como el resultado de eventos naturales adversos que ocasionan grandes daños y perjuicios en las áreas afectadas, que sobrepasan la capacidad local de restablecimiento de la normalidad (Tobin, G. A y Montz, B.E., 1997). En el Perú, particularmente en la cordillera Blanca han ocurrido y ocurren los mayores desastres de origen glaciar, sobresalen los flujos de detritos y las inundaciones asociadas a la ruptura de los diques morrénicos. Según Ames, A (1998) estos fenómenos son desencadenados por un conjunto de factores:

- a. Masas glaciares
- b. Topografía abrupta
- c. Presencia de lagunas en la parte inferior de los glaciares
- d. Fenómenos sísmicos

Debido al acentuado retroceso glaciar, las localidades situadas en la base de las montañas, donde ocurren frecuentes desastres, se tornan en zonas de alto riesgo como el valle del río Santa.

La Tabla 1 presenta los principales desastres de origen glaciar ocurridos en el valle del río Santa y muestra para dónde se desplazan los flujos de detritos provenientes del Parque Nacional Huascarán. Se puede observar que los principales desastres ocurrieron en el siglo XX, esto puede estar vinculado con el crecimiento poblacional de las ciudades del valle del río Santa y el derretimiento de los glaciares debido a los efectos del calentamiento global en esta parte de los Andes. Los desastres fueron muy violentos y dejaron millares de muertos, que, sumando los casos mencionados, pueden llegar a 35 000 muertos (USGS, 2007). Otras estimaciones, elevan la cifra a más de 100 000 muertos.

TABLA 1.
Desastres naturales de origen glaciar en el valle del río Santa, Perú

Fecha	Municipio	Descripción
04/03/1702	Huaraz	Las inundaciones destruyen parte de la ciudad de Huaraz
06/01/1702	Huaraz	El terremoto y la avalancha de hielo provocaron inundaciones que dañaron la ciudad de Huaraz. Murieron 1500 personas.
06/01/1702	Yungay	El flujo de detritos del nevado Huandoy provocó una inundación, destrozando la ciudad de Yungay, hubo 1500 personas muertas.
13/12/1941	Huaraz	El flujo de detritos provenientes de la laguna Palcacocha dañó la ciudad de Huaraz. Aproximadamente, murieron 5000 personas.
10/01/1962	Yungay	Flujo de detritos del Huascarán norte. Cerca de 4000 personas muertas y destrucción de 9 ciudades, entre ellas Ranrahirca.
31/05/1970	Yungay	Flujo de detritos (rocha y hielo) del Huascarán norte destruyó la ciudad de Yungay. Murieron aproximadamente 22 000 personas.
19/03/2003	Huaraz	Desmoronamiento parcial de la morrena lateral izquierda de la laguna Palcacocha (al este de Huaraz).

Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), 2007.

3.3.1 Catástrofe de Yungay

El valle del río Santa fue afectado por el mayor desastre asociado a glaciares registrado en todo el mundo. En la Figura 3 se puede observar el desplazamiento y dirección del flujo de detritos ocurrido el día 31 de mayo de 1970. Ese día ocurrió un terremoto de magnitud 7,7 en la escala Richter con epicentro a 25 km de la ciudad costera de Chimbote, localizada a aproximadamente 100 km al oeste de la ciudad de Yungay (Ericksen, G. E. y Plafker, G. (1970). Los temblores de tierra ocasionaron una gran fractura en el glaciar Huascarán del Parque Nacional Huascarán provocando la caída de una gran masa de hielo que se deslizó a gran velocidad por el río Sachsa.

Según Ericksen, G. E. y Plafker, G. (1970), el flujo formado por rocas, hielo y barro presentó un volumen de 50-100 millones m³ y pudo haber alcanzado velocidades en torno a 250-400 km/h. Los autores estiman que fueron destruidas o seriamente damnificadas cerca de 186 000 edificaciones que corresponden a casi el 90 % del total existente en la región. Este desastre dejó cerca de 70 000 muertos y 50 000 heridos. Las ciudades de Yungay y Ranrahirca fueron las más impactadas, pues ahí

murieron cerca de 23 000 personas. En Yungay, cerca de 15 km² fueron completamente enterrados, transformándose en un “campo santo” (Figura 4).

FIGURA 3.

Fotografía aérea del flujo de detritos que enterró las ciudades de Yungay y Ranrahirca en 1970



Fuente: Ericksen, G. E. y Plafker, G. (1970).

FIGURA 4.

La ciudad de Yungay antes y después del desastre del 31 de mayo de 1970
Destaca el área de "campo santo" donde millares de personas fueron sepultadas



Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), 2007.

3.4 EL USO DE SENSORES REMOTOS EN EL ESTUDIO DE GLACIARES

Gracias a los sensores remotos se obtiene información acerca de la superficie terrestre a través del análisis de datos adquiridos por sensores que no están en contacto con el objeto de investigación Lillesand, T. y Kiefer, R. (1994). Sus aplicaciones más importantes según Schowengerdt (1997) son monitoreo y evaluación ambiental, agricultura, exploración de recursos naturales y mapeos en general (topografía, geomorfología, cobertura del terreno, seguimiento de geoprocesos).

Debido a sus ventajas, los sensores remotos se han convertido en una de las herramientas más importantes en la evaluación del deshielo de los glaciares. Nuevos métodos de análisis han surgido con el avance de las geotecnologías, los mismos que están asociados a la aparición de nuevos sensores muy eficaces en el tratamiento de las imágenes (Bishop et al., 2000; Käab et al., 2003).

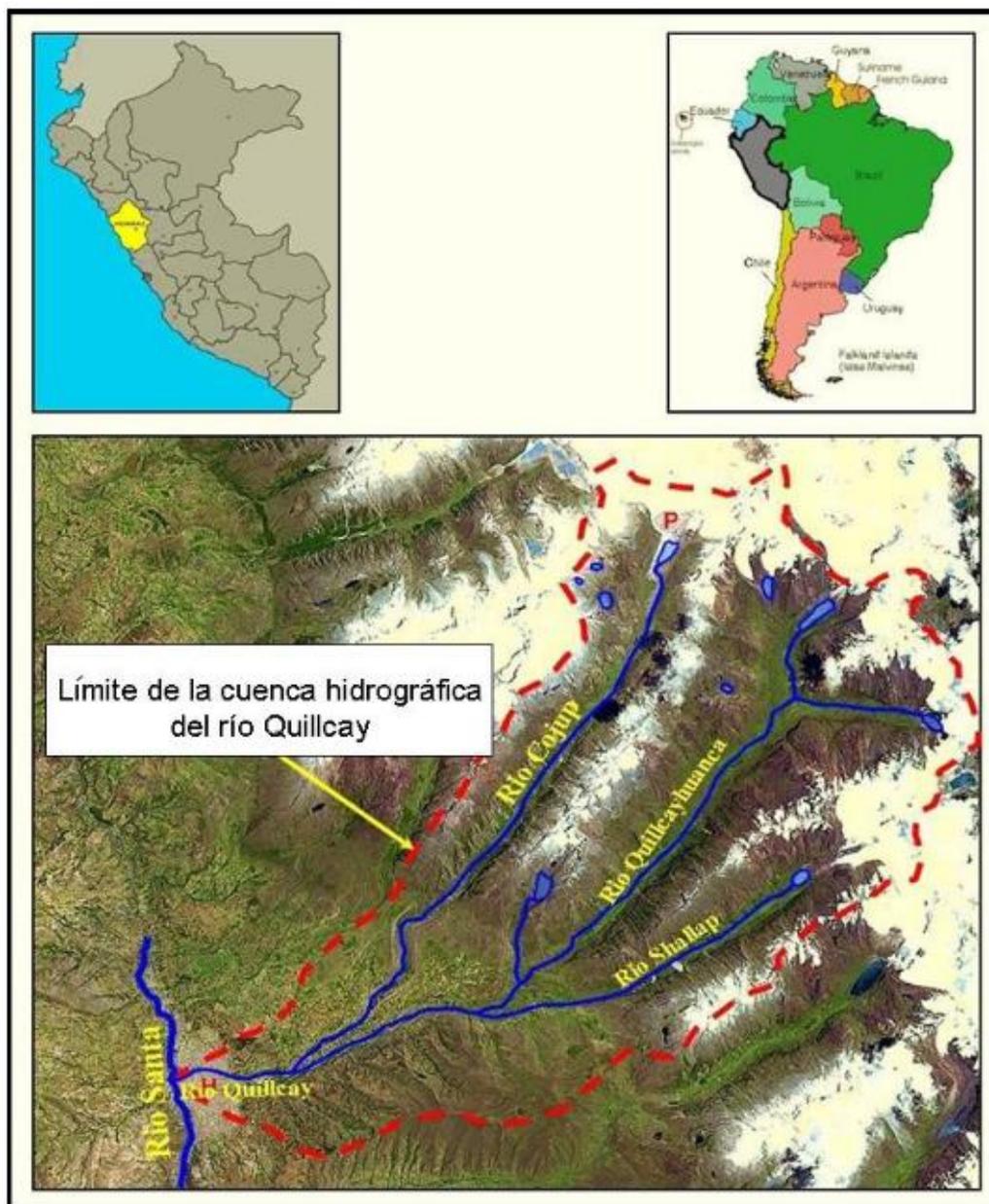
La evaluación y el monitoreo de los glaciares potencialmente peligrosos y de las lagunas glaciares han sido tareas tradicionalmente realizadas mediante mediciones en campo. Sin embargo, son varios los problemas identificados en el proceso de monitoreo de los glaciares. Un ejemplo de ello es el difícil acceso a los lugares de muestreo y medición, el costo del trabajo en campo para recoger la información, las inclemencias meteorológicas, e incluso en algunos países, las políticas sensibles (ausencia de seguridad) que impiden la realización de las investigaciones.

El avance de las geotecnologías ha desarrollado nuevos métodos de análisis y de tratamiento de imágenes asociados a la aparición de nuevos sensores. Como ejemplo, se cita el proyecto GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) que monitorea la situación de los glaciares en todo el mundo realizando mediciones con datos provenientes de las imágenes del sensor ASTER (Kieffer et al., 2000). Se cree que debido a las similitudes espectrales y hasta espaciales existentes entre los sensores ASTER y los sensores TM y CCD de los satélites LANDSAT 5 y CBERS, respectivamente, será posible monitorear más el área glaciar, debido a una mayor cantidad de imágenes disponibles y a una mayor probabilidad de obtener imágenes con poca cobertura de nubes.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está localizada en el sector sur del Parque Nacional Huascarán en la cuenca hidrográfica del río Quillcay (Figura 5). Esa cuenca está localizada en las proximidades de la ciudad de Huaraz, provincia de Huaraz, capital del departamento de Ancash, situada en la parte central del valle del río Santa. La ciudad de Huaraz es la más poblada y desarrollada de este valle con una población de 143 415 habitantes, una densidad demográfica de 57,5 hab./km² y una renta per cápita de 4276 soles (INEI, 2005).

FIGURA 5.
Localización del área de estudio

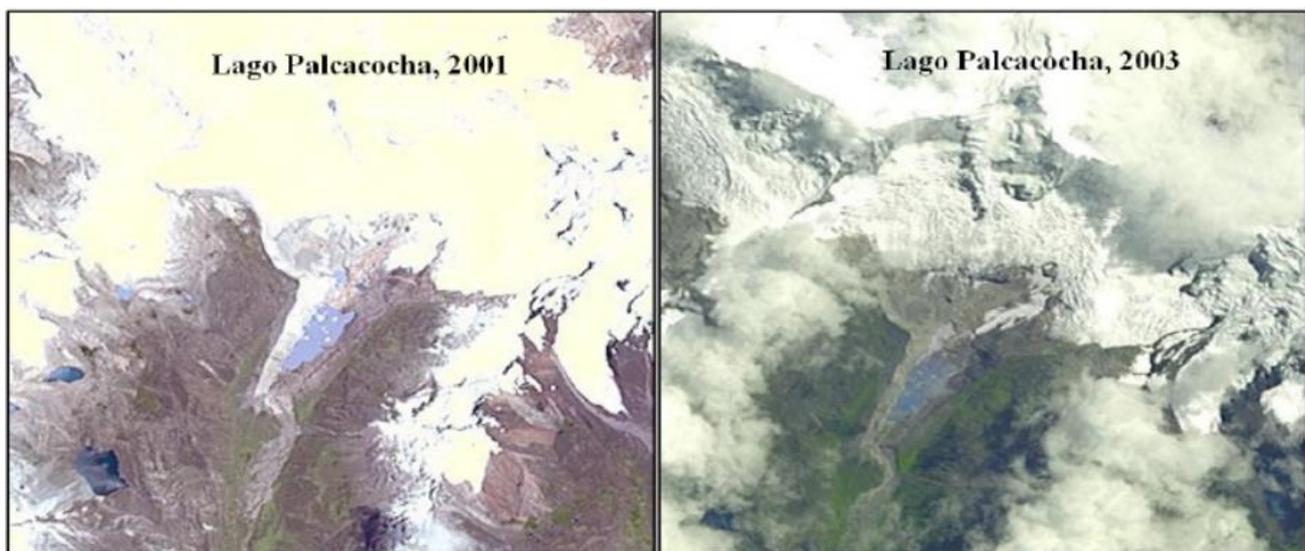


Fuente: adaptada de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), 2007.

Los glaciares más importantes y con una localización próxima a la ciudad de Huaraz son Ranrapalca, Palcaraju, Pucaranra, Chinchey, Tullparaju, Cayesh, Churup, Huantsán. El deshielo de los mismos originó las lagunas Palcacocha, Tullpacocha, Tullpacocha, Shallap y Churup. Estas tres últimas lagunas drenan al río Quillcayhuanca, formando el río Auqui; y a partir de la laguna Palcacocha sobre el río Cojup, se forma el río Paria, al confluir, ambos forman el río Quillcayque atraviesa toda el área urbana de de Huaraz. Cualquier evento asociado a flujos de detritos o avalanchas pone en riesgo la ciudad, pudiendo dejar como saldo a millares de muertos. Actualmente, una de las lagunas que está siendo monitoreada es la laguna Palcacocha, localizada a más de 4.500 m de altitud. Tiene una situación semejante a la que presentó en 1941 cuando se desencadenó un flujo de detritos que mató a 3.500 personas (USGS, 2007). En las últimas décadas se ha incrementado el tamaño de la laguna debido al deshielo de los glaciares Pucaranra y Palcaraju. En la Figura 6, se puede observar los cambios en los períodos 2001 y 2003.

FIGURA 6.

Incremento del tamaño de la Laguna Tullpacocha monitoreada por el sensor ASTER: imagen de 2001 (izquierda) e imagen de 2003 (derecha)



Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), 2007.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 MATERIAL

Mosaico NASA, bandas 7, 4 y 2 del sensor ETM+ LANDSAT-7 de 18 de mayo de 2000.

Imágenes del satélite Landsat 5, sensor TM, de los años 1988, 1997, 2006 (Bandas 1, 2, 3, 5, 6 e 7). Las imágenes fueron obtenidas del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Tabla 1).

TABLA 1.
Características de las imágenes utilizadas

Satélite	Órbita/Punto	Fecha	Banda	Formato	Resolución espacial
Landsat-5/TM	8/67	1988/08/05	1, 2, 3, 5 y 7	Digital/CD	30 m
Landsat-5/TM	8/67	1997/07/29	1, 2, 3, 5 y 7	Digital/CD	30 m
Landsat-5/TM	8/67	2006/07/06	1, 2, 3, 5 y 7	Digital/CD	30 m

Fuente: Elaborado por el autor.

El software utilizado en este trabajo fue el SPRING versión 4.3.2

5.2 MÉTODOS

El proceso metodológico se desarrolló en dos etapas. Una relacionada con la creación del banco de datos y la otra con el análisis de la dinámica de los mapas temáticos de uso y cobertura referentes a los años 1988, 1997 y 2006.

a) Creación del banco de datos

Según Hansen (1989), el banco de datos (BD) es una estructura que guarda registros de forma integrada o compartida, y permite que ítems de datos individuales sean usados por diferentes programas para combinar diversos conjuntos de datos.

Un sistema de BD es un programa computacional, normalmente, grande y complejo, que permite al usuario el intercambio de datos, actualizaciones, correcciones de errores, etc. El sistema opera con datos numéricos, alfanuméricos y fechas entre otros. Un BD posee lenguajes para la descripción y la manipulación de datos de investigaciones de elementos espaciales de la información. Así, también, provee herramientas de programación y posee estructuras particulares (Hansen, 1989).

Para la creación de la BD de este proyecto se utilizó el software SPRING. Este sistema de Geoprocesamiento puede ser definido como un conjunto de herramientas para el tratamiento de informaciones espaciales, generación de salidas en forma de cartografías convencionales, informes, archivos digitales, y otros. Esto facilita recursos para almacenar, gestionar, manipular y analizar datos (INPE, 2007).

La BD del SPRING almacena todas las definiciones de categorías de datos que aparecen en los diversos tipos de mapas (PI's), y que están constituidos por todas las entidades geobjetos y geocampos (SPRING, 2007).

La BD Nevado Sur se ha formado para el proyecto llamado Parque Sur, creado en proyección UTM/WGS84 con un área (rectángulo envolvente) definida por las coordenadas geográficas 9° 39' 00" y 9° 15' 00" S; 77° 39' 00" y 77° 14' 00" O.

Las categorías de cartografía temática, hidrografía, geología, vías al 2007 y límites, correspondientes al modelo de datos temáticos fueron creadas en el proyecto, y los datos en formato ASCII para nuevos PIs en el proyecto Parque Sur. En el SPRING los datos se dispusieron en categorías y planos de información.

TABLA 2.
Modelo de datos aplicados en el SPRING.
Modelo de datos Parque Sur

Categoría	Modelo	Tipo de datos	Plano de información (PI)	Clases
Imágenes	Imagen	Mosaico NASA	Nevsur 1 Nevsur 2 Nevsur 3	
Imagen sensor	Imagen	Landsat TM-5	TM b3 1988 TM b4 1988 TM b5 1988 TM b3 1997 TM b4 1997 TM b5 1997 TM b3 2006 TM b4 2006 TM b5 2006	
Imagen sensor	Imagen	Imagen segmentada	88-543seg1050-99 97-543seg1050-99 06-543seg1050-99	
Imagen sensor	Imagen	Imagen clasificada	88-543clas1050-99 97-543clas1050-99 06-543clas1050-99	
Cartatema	Temático	Imagen mapeada	88-543clas1050-99-T 97-543clas1050-99-T 06-543clas1050-99-T	hielo; Laguna; uso/cobertura
Geológico	Temático	Imagen temática	Morrenas Fallas geológicas	
Hidrografía	Temático	Imagen temática	Cuenca-Quillcay Ríos Landsat-tm	
Vías2007	Temático	Imagen temática	Principal Secundaria	
Límites	Catastral	Imagen temática	Areaurbana Dishuaraz Provincial Cap-prov	

Fueron creadas las categorías IMASENSOR e IMÁGENES que contenían los planos con la información referente a las imágenes de cada satélite. Las imágenes del satélite Landsat estaban en el formato GEOTIFF. Estos datos fueron leídos con el utilitario de importación de imágenes IMPIMA de la versión 4.3.2 del SPRING produciendo archivos GRIB's (*Gridded Binary*) para los sensores TM (bandas 3, 4 y 5) de los años 1988, 1997 y 2006, respectivamente.

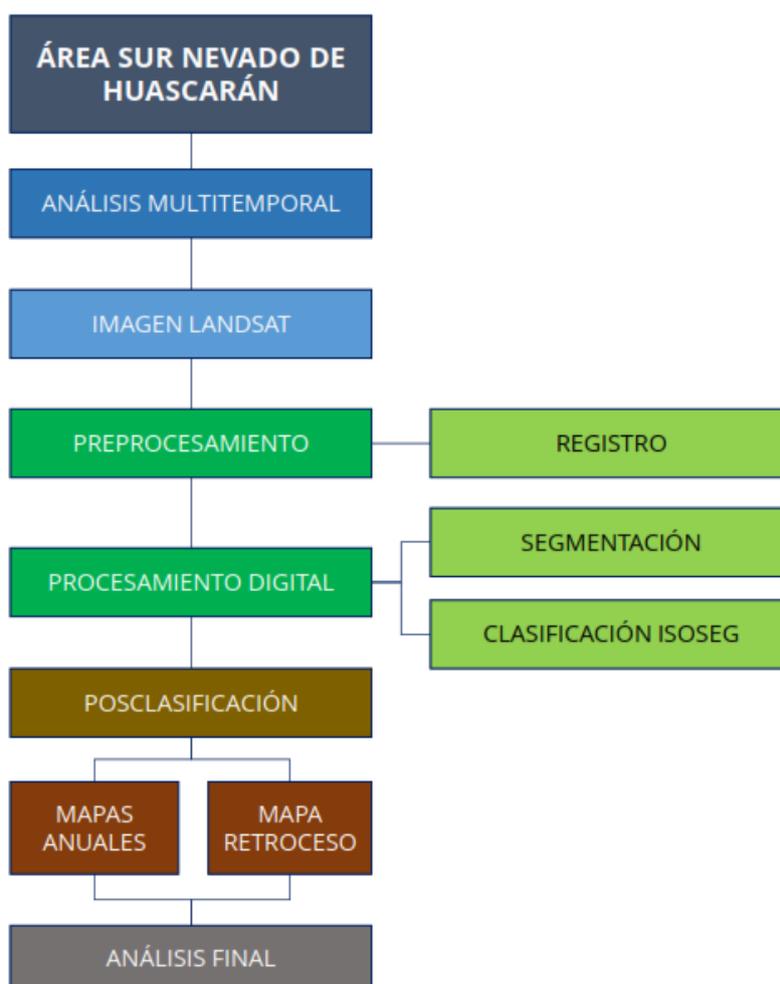
Las imágenes, traídas del IMPIMA para el proyecto, tienen una resolución espacial de 30 metros. Este procedimiento permitiría integrar las imágenes de los sensores TM para obtener los cambios ocurridos entre los años de 1988, 1997 y 2006. Los archivos GRIB's de las Imágenes fueron registrados e importados para dentro de los PI's de las referidas categorías presentando un total de 2364 columnas y 1410 líneas, lo que facilitó el análisis comparativo de las imágenes multitemporales envueltas en este trabajo.

b) Análisis de la dinámica de los mapas de uso y cobertura de 1988, 1997 y 2006.

La metodología empleada en esta propuesta puede ser visualizada mejor a continuación:

FIGURA 1.

Flujograma del trabajo propuesto



Fuente: Elaborado por el autor

5.2.1 Descripción de las etapas

a) Preprocesamiento

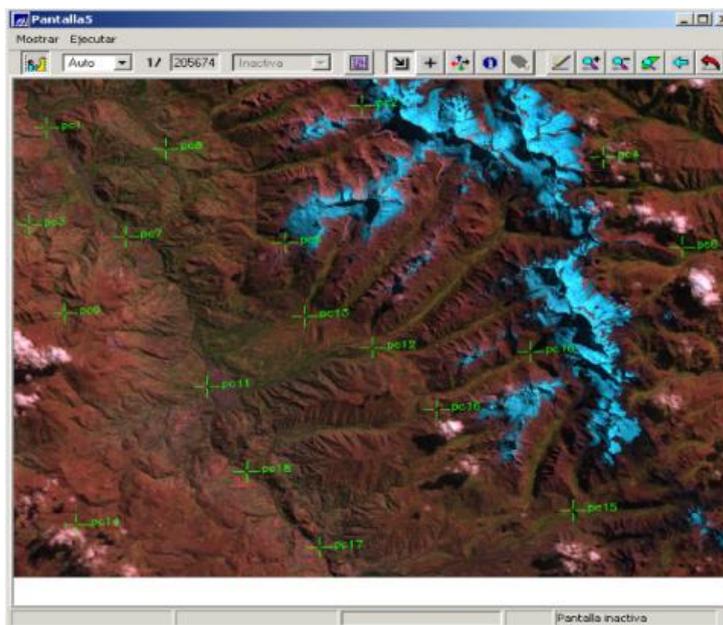
Consiste en la preparación de los datos provenientes de las imágenes satelitales para su clasificación. Estas técnicas permiten mejorar la calidad de los datos reduciendo las “interferencias” o errores que se producen en los sensores durante la toma de la información. Las más comunes son las correcciones geométrica, radiométrica y atmosférica. (Moreira, M. A. 2005).

En este trabajo, primero se recortó el área de estudio y posteriormente se registraron las imágenes. El registro es una transformación geométrica que relaciona las coordenadas de la imagen (línea y columna) con las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de un mapa. Esa transformación elimina distorsiones geométricas existentes en la imagen causadas en el proceso de generación de la misma por el sistema sensor y por la imprecisión de los datos de posicionamiento de la plataforma (Chuvieco, E. 2002).

Así, las imágenes del sensor TM del satélite LANDSAT 5 para los años 1988, 1997 y 2006 fueron registradas utilizando como referencia la imagen ortorreferenciada del mosaico NASA de 2000. En la Figura 2 se presentan los puntos de control utilizados en la georreferenciación de las imágenes para todas las fechas analizadas.

FIGURA 2.

Puntos de control utilizados para el georreferenciamiento de las imágenes Landsat



Se seleccionaron las bandas utilizadas para mapear el deshielo de los glaciares. La selección se basó tanto en la literatura pertinente, así como en una evaluación visual, que implicó un conocimiento previo del área de estudio para facilitar la identificación de los elementos y el tipo de procesamiento digital que serían adoptados.

b) Procesamiento digital de imágenes

En esta etapa, se aplicó la técnica de realce de contraste que tiene por objetivo mejorar la calidad de las imágenes para lograr que el ojo humano realice una buena identificación visual de los elementos de la escena.

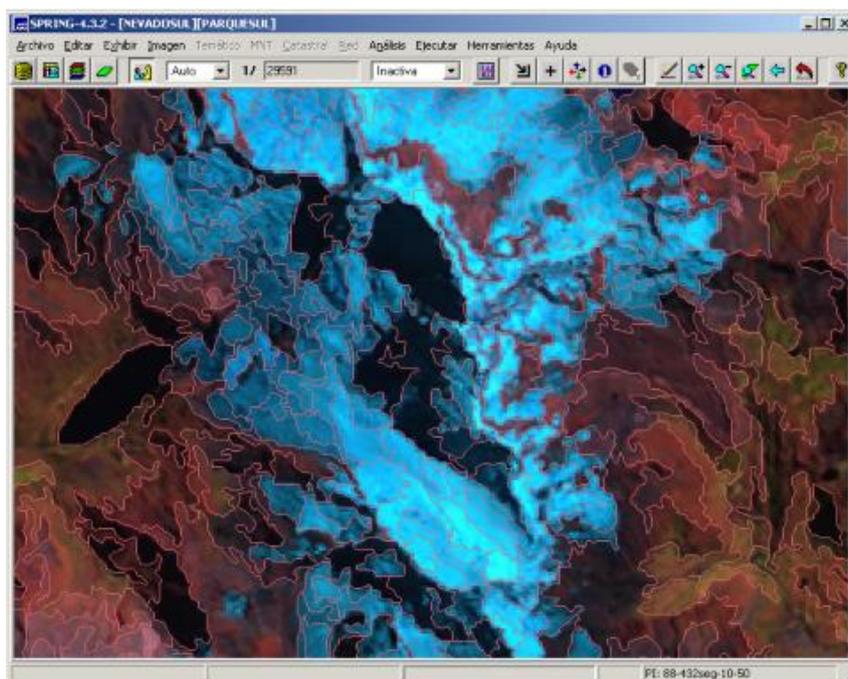
c) Clasificación y mapeo de la imagen

La clasificación digital consiste en seleccionar un conjunto de píxeles de los elementos que componen la imagen. Estos elementos, organizados en clases temáticas previamente definidas por el usuario, se convierten en clasificadores supervisados. En otros casos, cuando las reglas de la clasificación temática son definidas automáticamente por el clasificador se denominan clasificadores no-supervisados (Chuvieco, 1994).

En este estudio se utilizó un clasificador no-supervisado, debido a que los glaciares presentan una reflectancia relativamente homogénea (hielo/ nieve) y con un excelente contraste en relación a los elementos vacíos (suelo/roca). Albert (2002) evaluó diversos clasificadores en el nevado de Quellcaya al sur de los Andes peruanos. El autor verificó que el clasificador ISODATA presentó una exactitud por encima del 90 %. Aniya et al. (1996) también adoptó el ISODATA para mapear la capa de hielo de la región de la Patagonia. Debido a que el software SPRING no tiene este clasificador se utilizó un clasificador con especificaciones similares, el ISOSEG (SPRING, 2007). A continuación describimos los pasos que se adoptaron:

- **Segmentación de la imagen:** el clasificador separa un agrupamiento de píxeles en regiones homogéneas que presentan valores estadísticos similares. Después de realizar algunos tests de similitud, se segmentaron las imágenes de 1988, 1997 y 2006 utilizando valores de Similariedad = 10 y Área = 50. La Figura 3 presenta un ejemplo de segmentación utilizando como base la composición colorida 543 (RGB).

FIGURA 3.
Ejemplo de imagen segmentada



- **Clasificación de la imagen:** antes de realizar la clasificación de la imagen segmentada se establece un limiar (borde) de aceptación para la definición de las clases. Los clasificadores por regiones utilizan, además de la información espectral de cada "píxel", la información espacial que envuelve la relación entre los "píxeles" y sus vecinos. Estos clasificadores buscan simular el comportamiento de un fotointérprete, al reconocer áreas homogéneas de imágenes, basadas en propiedades espectrales y espaciales de Imágenes. La información del borde es utilizada inicialmente para separar las regiones y las propiedades espaciales y espectrales que unirán áreas con la misma textura (SPRING, 2007).

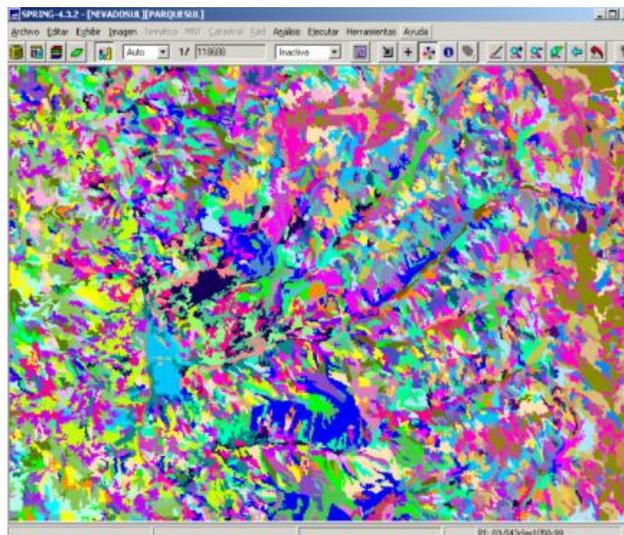
El clasificador ISOSEG es uno de los algoritmos disponibles en el SPRING para clasificar regiones de una imagen segmentada. Es un algoritmo de agrupamiento de datos no-supervisado aplicado sobre el conjunto de regiones que se caracteriza por tener características comunes en sus atributos estadísticos de media, matriz de covarianza y también por el área.

Un algoritmo de "clustering" no supone ningún conocimiento previo de la distribución de densidad de probabilidad de los temas como ocurre en el algoritmo de la máxima verosimilitud. Es una técnica de clasificación que procura agrupar regiones, a partir de una medida de similitud entre ellas. La medida de Similitud utilizada es la distancia de Mahalanobis entre la clase y las regiones candidatas a la relación de pertinencia con esta clase.

El ISOSEG utiliza los atributos estadísticos de las regiones: matriz de covarianza y vector de media para estimar el valor central de cada clase (SPRING, 2007). Fueron probados 4 umbrales (bordes) de aceptación (99, 95, 90 y 75) para las escenas de los años 1988, 1997 y 2006. El umbral de aceptación adoptado fue el 99 % porque respetaba más la forma del glaciar permitiendo realizar un mapeo con más precisión. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de imagen clasificada utilizando el clasificador ISOSEG. El clasificador generó 9 clases que fueron analizadas y renombradas como: "morrena", "glaciares", "Lagunas", "ríos", "nubes", "sombra", "escarpe", "suelo expuesto", "pasto natural" y "área urbana".

FIGURA 4.

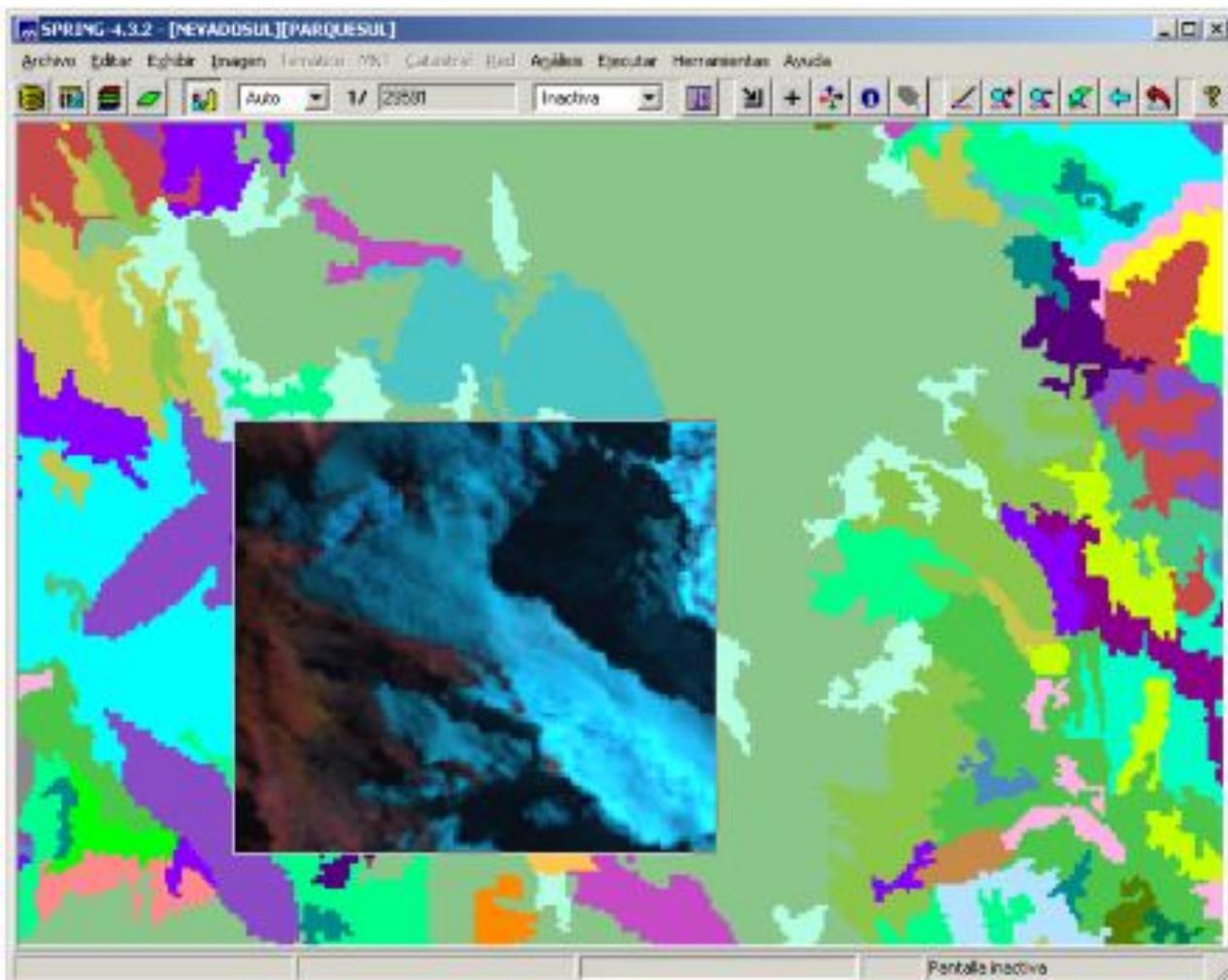
Ejemplo de imagen clasificada con ISOSEG



- **Posclasificación:** en esta etapa, con el objetivo de mejorar el resultado, el usuario interviene directamente en el proceso eliminando las clases aisladas. La clasificación presenta un número amplio de clases que fueron agrupadas en cuatro formas: "morrena", "glaciares", "lagunas", "uso/cobertura". Para definir ese agrupamiento, la clasificación fue confrontada con la composición colorida 543 (RGB) que quedaba de fondo (Figura 5). De esta forma, el usuario puede hacer la reclasificación de la imagen.

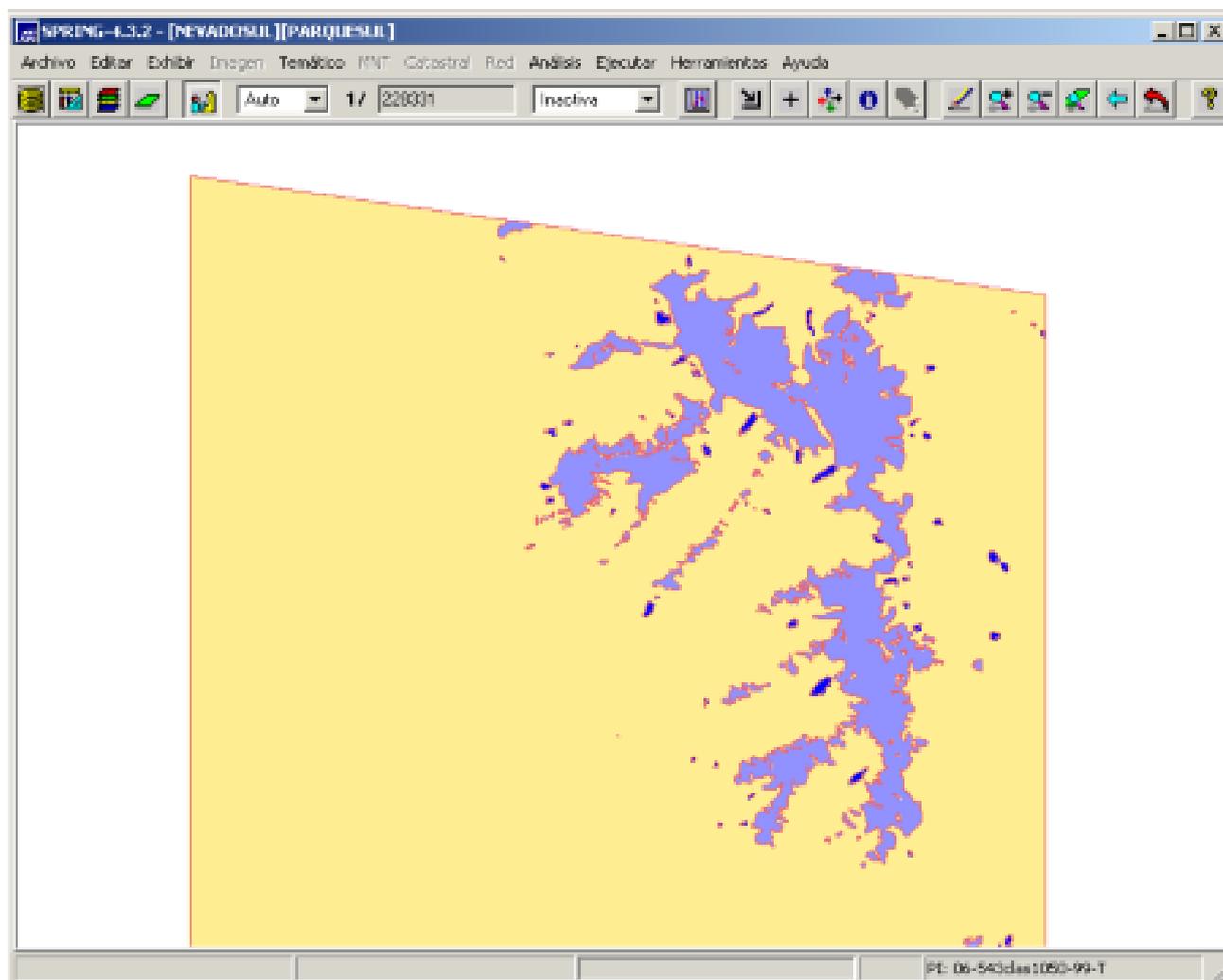
FIGURA 5.

Proceso de reclasificación con una combinación de imagen 543 (RGB) de fondo



- **Mapeo:** es el momento en que la imagen clasificada (Categoría Imagen) es transformada en un mapa temático raster (Categoría Temático). El mapa temático resultante del uso de la tierra en el Parque Sur se realizó considerando las siguientes clases: "morrena", "glaciares", "Lagunas", "uso/cobertura". En la Figura 6, se puede observar el resultado final de dicho mapeo en el año 2006.

FIGURA 6.
Resultado final del mapeo de clases temáticas



6. RESULTADOS PRELIMINARES

6.1 ANÁLISIS DEL RETROCESO EN LOS AÑOS 1988, 1997 Y 2006

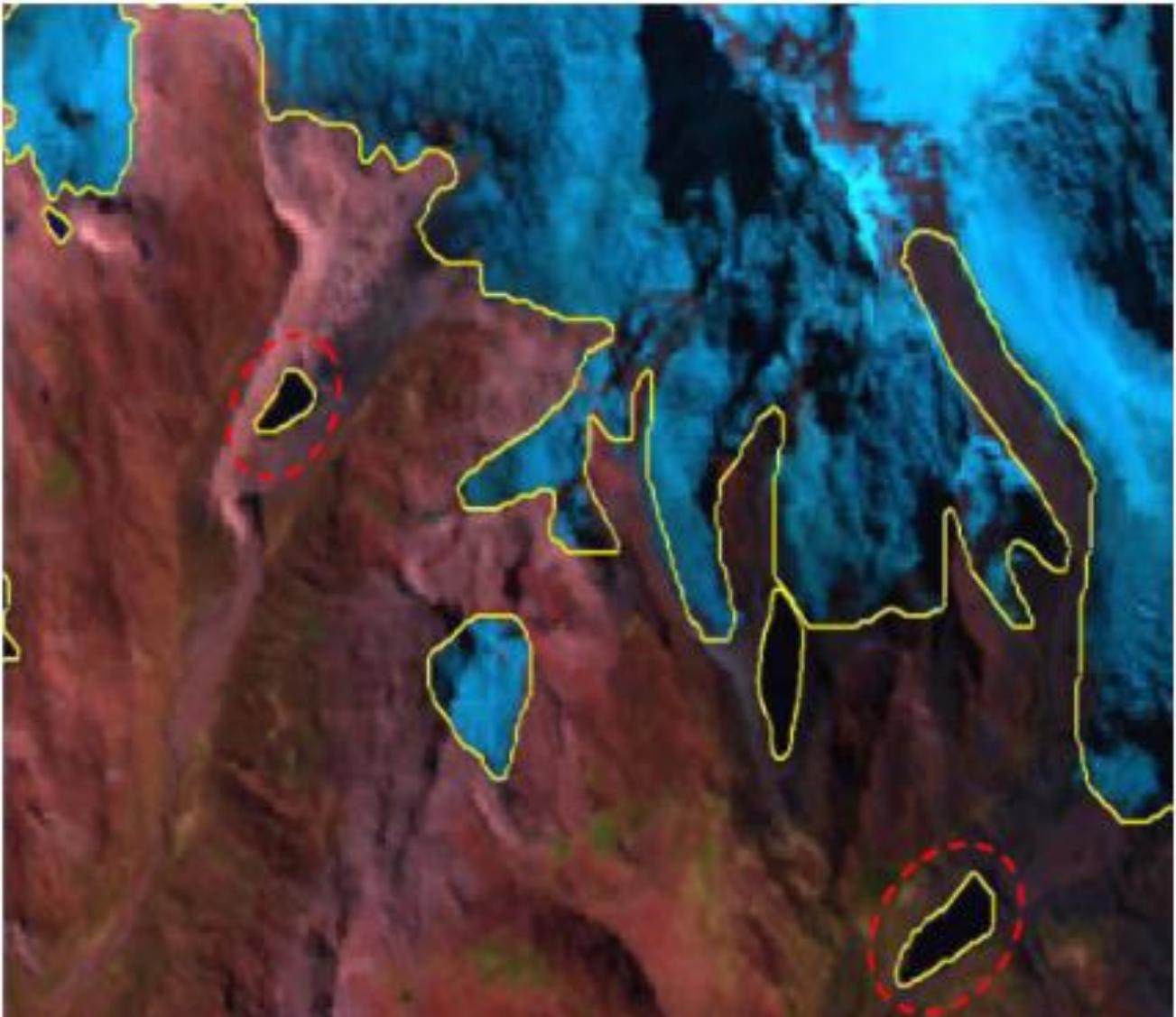
Con relación a las fechas de mapeo se optó por utilizar un intervalo de 9 años entre sí. Conforme a lo verificado en los trabajos de Georges (2004), Quincey et al. (2005), Silverio, W. y Jaquet, J. (2005) y Vilimek et al. (2005), este es un tiempo suficiente para que ocurra algún tipo de modificación en la extensión de la cobertura de hielo de los glaciares y en el volumen de agua de las lagunas glaciares.

El área de mayor importancia en este trabajo fueron los glaciares del sector sur del Parque Nacional Huascarán y las lagunas de origen glaciar de la cuenca hidrográfica del río Quillcay. Utilizando el método de clasificación ISOSEG se logró diferenciar y separar con bastante eficiencia las áreas de glaciares y lagunas de los demás elementos presentes en la escena, principalmente en esta área. En la Figura 7, que corresponde a la imagen clasificada de 1988, se puede observar la localización de las

lagunas Palcacocha (a izquierda) y Tullpacocha (a derecha) y la correcta delimitación de los glaciares y cobertura de nieve (línea amarilla).

FIGURA 7.

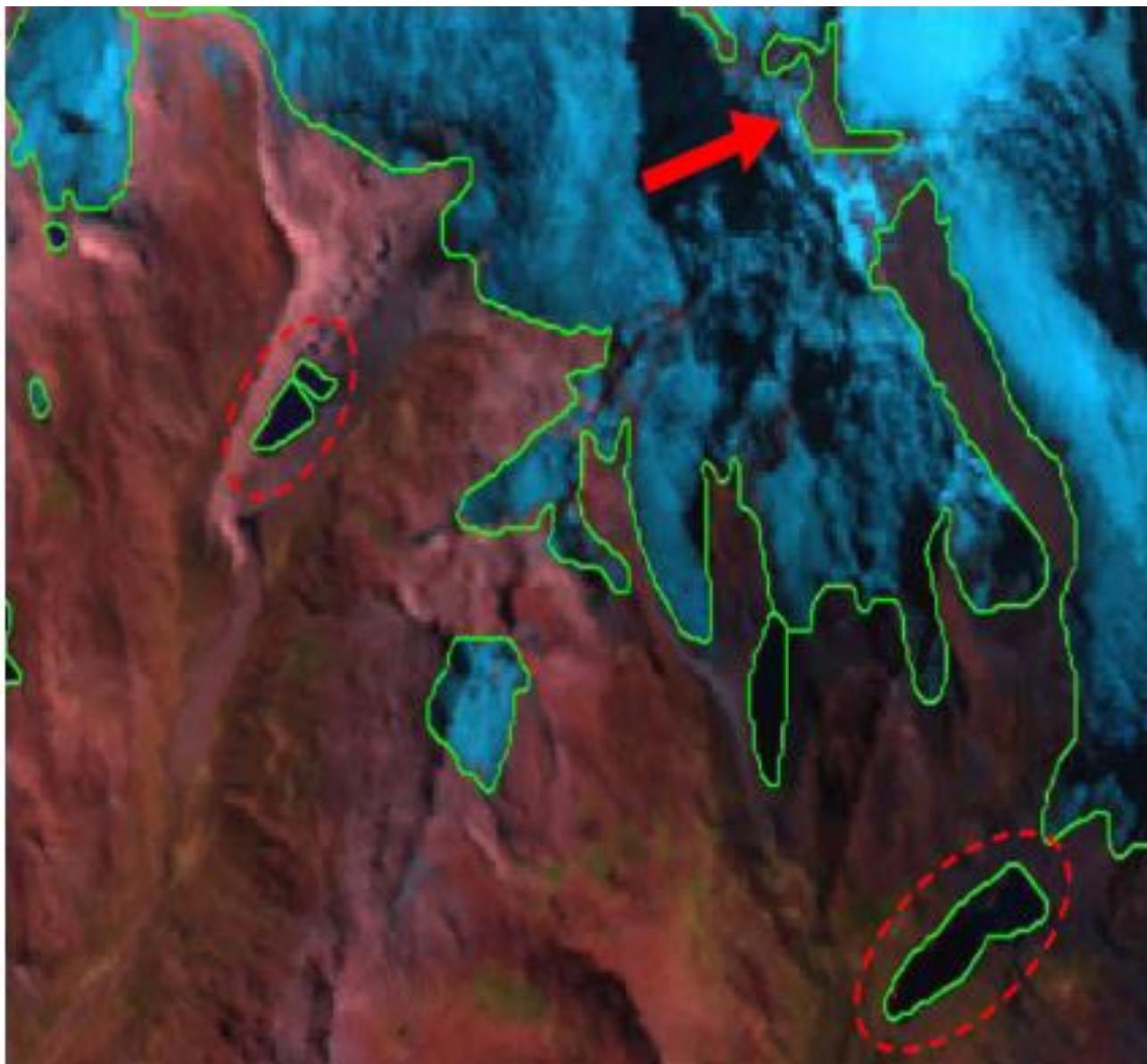
Delimitación de las áreas de glaciares y lagunas de la subcuenca del río Quillcay en 1988



Para el año 1997, en la Figura 8, se observa un incremento significativo de las lagunas Palcacocha (2,86 ha.) y Tullpacocha (11,7 ha.) en relación al año de 1988. Así mismo, el límite de los glaciares presentó un retroceso acentuado, presentado en algunos puntos algunas áreas de deshielo (flecha roja) que no fueron identificadas en la imagen de 1988.

FIGURA 8.

Delimitación de las áreas de glaciares y lagunas de la subcuenca del río Quillcay en 1997



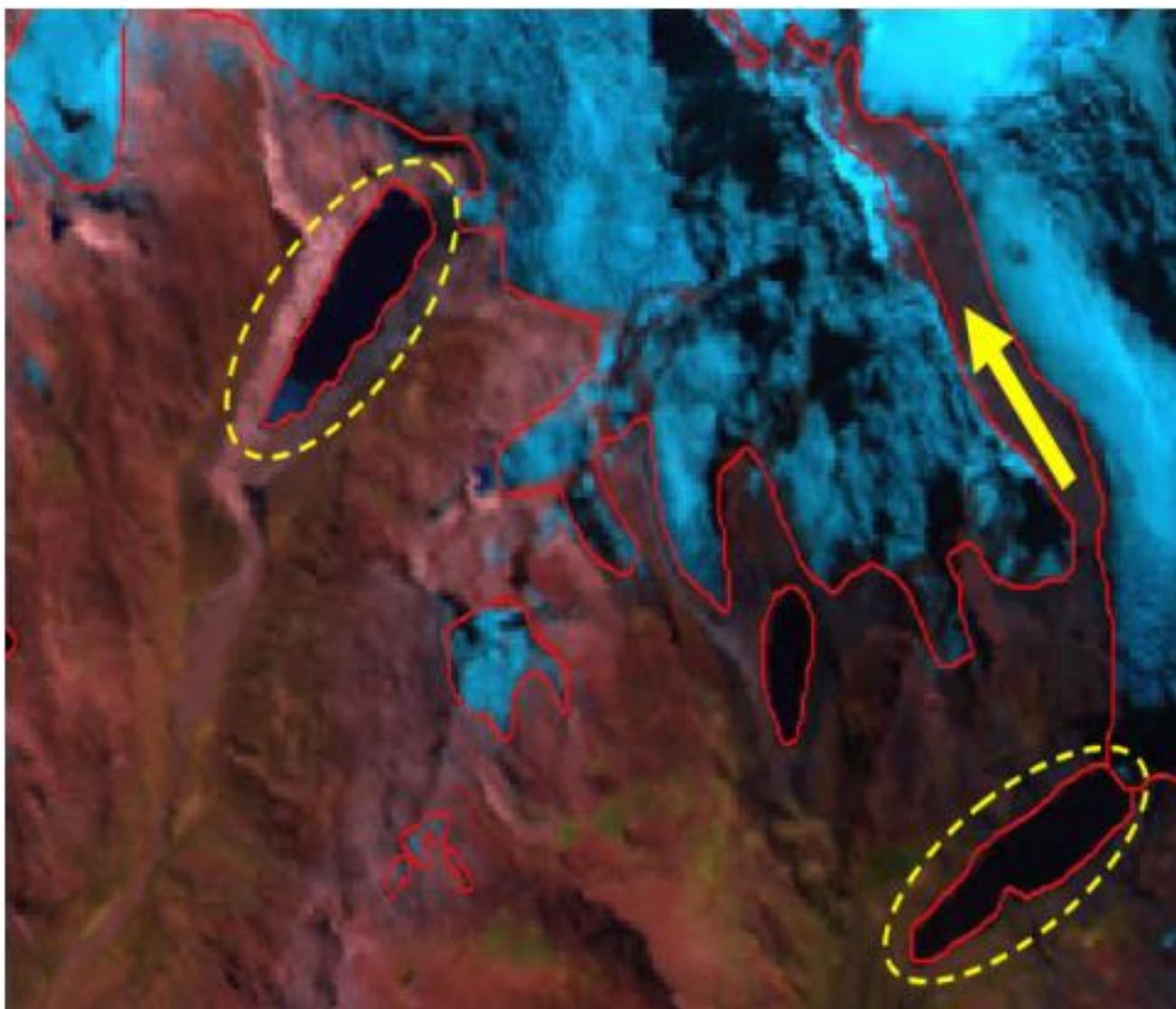
El incremento del área de las lagunas y la disminución del área de los glaciares fue más acentuado en el año de 2006 (Figura 9). Lo que más llamó la atención, en relación a 1988 y 1997, fue el aumento del área de la laguna Palcacocha, con un incremento de 35,29 ha. en relación a 1997. La laguna Tullpacocha a pesar de haber aumentado de tamaño (19,23 ha.), no presentó una gran variación en estos 18 años que ha abordado el estudio.

Por otra parte, hubo una disminución significativa de las áreas de glaciares. Por ejemplo, un segmento de glaciar que separa el área de deshielo en 1997 del área de valle desapareció completamente, mostrando un avance del deshielo en las zonas más bajas (flecha amarilla), que

corresponden a las áreas de fondo de valles. Consideramos que fueron las aguas de ese deshielo, las que alimentaron la laguna Tullpacocha.

FIGURA 9.

Delimitación de las áreas de glaciares y lagunas de la subcuenca del río Quillcay en 2006



En las tablas 3 y 4 se puede observar el severo cambio ocurrido en las lagunas Palcacocha y Tullpacocha en el período 1988 - 2006. Es interesante notar que, a pesar de quedar con tamaños semejantes, tanto el área cuanto el perímetro de la laguna Palcacocha aumenta considerablemente en la última década.

Esto viene a confirmar la preocupación de la NASA por monitorear esta laguna con imágenes del sensor ASTER. Este aumento considerable en el volumen del agua pone en riesgo a toda la población de la ciudad de Huaraz, configurando un escenario similar al ocurrido en Yungay. Es decir, si ocurriera un fuerte terremoto en la región es posible que el dique existente se rompa, produciendo un violento flujo de agua, hielo y roca pendiente abajo que podría enterrar parte de la ciudad de Huaraz, dejando

un gran número de víctimas fatales. Es importante resaltar que en ambas lagunas el mayor incremento de área ocurrió en la última década. Esto viene a confirmar las observaciones realizadas por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) que ha indicado que 11 de los últimos 12 años (1995-2006) están entre los años más calientes ya registrados desde 1850 (IPCC, 2007).

TABLA 3.

Incremento del área de la laguna Palcacocha en el período 1988- 2006

Año	Área (ha)	Perímetro (km)	Incremento			
			Área (ha)		Perímetro (km)	
			1988-1997	1997-2006	1988-1997	1997-2006
1988	6,19	1,03	2,86	35,29	0,75	1,59
1997	9,05	1,78				
2006	44,34	3,37				

TABLA 4.

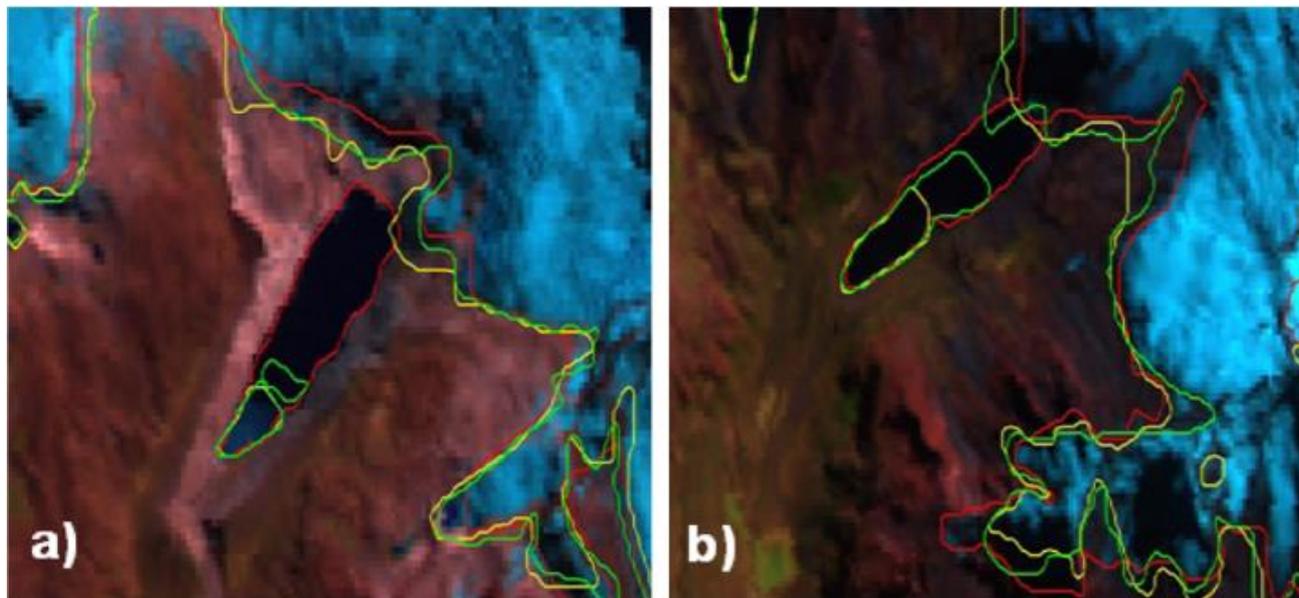
Incremento del área de la laguna Tullpacocha en el período 1988 - 2006

Año	Área (ha)	Perímetro (km)	Incremento			
			Área (ha)		Perímetro (km)	
			1988-1997	1997-2006	1988-1997	1997-2006
1988	15,18	1,74	11,7	19,23	0,91	0,96
1997	26,88	2,65				
2006	46,11	3,61				

La Figura 10 permite observar con mayor claridad el incremento de las lagunas glaciares localizadas dentro de la subcuenca hidrográfica del río Quillcay, así como la disminución de las áreas de los glaciares correspondientes al sector sur del Parque Nacional Huascarán en el período 1988-2006. El color amarillo corresponde al año 1988, el verde al año 1997 y el rojo al año 2006.

FIGURA 10.

Incremento de las lagunas glaciares en la subcuenca del río Quillcay período 1988 – 2006



6.2 PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS

Teniendo como base los datos de deshielo obtenidos a través del proceso de clasificación de imágenes fue posible hacer una proyección del retroceso glaciar para un futuro próximo en el sector sur del Parque Nacional Huascarán. Esta proyección estimó que el deshielo para el 2013 corresponde a un período total de 25 años, tomando como punto de partida el año de inicio del análisis en este estudio, es decir, 1988.

Inicialmente se obtuvo una línea de tendencia, definida a partir de la cantidad de hectáreas que fueron perdidas por los glaciares en los años 1988, 1997 y 2006. Pero, después se utilizó el método de interpolación aritmética establecido por Santiago, et al. (2004) que consiste en la siguiente fórmula:

$$P_x = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{n} * t$$

Donde, P_x es la cantidad de hectáreas que se desea conocer para el escenario futuro; P_0 es la cantidad de hectáreas del primer año medido; P_1 es la cantidad de hectáreas en el último año medido; n es o número de años entre P_0 y P_1 ; y t es el número de años entre el primer año y el año que se quiere conocer. Así, substituyendo las variables por los valores obtenidos y deseados se obtuvo el siguiente resultado:

$$P_x = 18333.32 + \frac{16980.24 - 18333.32}{16} * 25$$

$$P_x = 16219,38 \text{ ha.}$$

La Tabla 5 presenta la comparación con los demás años analizados y el incremento del retroceso glaciar para 2013. Nótese, a través de esta tabla, que los glaciares continuaron sufriendo pérdidas significativas en su extensión de área de hielo.

Como no fue utilizada ninguna variable climática en esta proyección de escenario, las tasas pueden aumentar o disminuir en relación a esos valores. Por lo tanto, conforme al IPCC (2007), los modelos climáticos apuntan a pérdidas significativas de la extensión de hielo de los glaciares de montaña en las regiones tropicales. Si las tasas de deshielo continúan en esta proporción es muy probable que, en las próximas décadas, algunos glaciares de montañas tropicales dejen de existir.

TABLA 5.

Retroceso glaciar en el período 1988 - 2013 por el método de interpolación aritmética.

Año	Área (ha)	Perímetro (km)	Retroceso glaciar (ha)		
			1988-1997	1997-2006	2006-2013
1988	18333,32	647,09	11,7	630,82	760,86
1997	17611,06	682,98			
2006	16980,24	3,61			
2013	16219,38				

7. CONSIDERACIONES FINALES

La metodología adoptada resultó eficiente y mostró resultados satisfactorios, lo que permitió adaptarse fácilmente en imágenes de otros sensores ópticos como ASTER y CBERS.

Por otra parte, los resultados permiten constatar que en la actualidad las técnicas de sensoramiento remoto asumen un papel imprescindible en el monitoreo y mapeo de los glaciares de montaña, como los encontrados en la cordillera Blanca.

Los resultados obtenidos demuestran que durante el período 1988-2006 hubo un incremento significativo de las lagunas Palcacocha y Tullpacocha, así como una disminución de las áreas glaciares del sector sur del Parque Nacional Huascarán, ambos localizados en la subcuenca hidrográfica del río Quillcay. Esta variación, tanto en el tamaño de las lagunas como en el de los glaciares, puede estar directamente relacionada con el calentamiento global, principalmente cuando se comparan las tasas de deshielo y el aumento de temperatura en la última década que es considerada la más caliente desde 1850.

Este comportamiento no es aislado, sino una tendencia que se ha observado en investigaciones científicas realizadas en otros glaciares andinos, especialmente en aquellos localizados en la zona tropical. Casi todos los futuros monitoreos prevén que las tasas de deshielo continuarán incrementándose y que es posible que a mediados de este siglo muchos glaciares de montaña tropical puedan desaparecer.

La laguna Palcacocha se presenta hoy como un peligro potencial para la ciudad de Huaraz, constituyendo un riesgo elevado para la población local. Es necesario adoptar medidas estructurales

con urgencia no solo en el dique que presenta la laguna, sino también en los cauces del río que atraviesan las áreas más densamente ocupadas. También es fundamental que se realice un mapa de las áreas de riesgo de la subcuenca del río Quillcay, así como un trabajo de sensibilización y concientización de la población en el desarrollo de sistemas de alerta y áreas de seguridad. Los desastres naturales no pueden ser evitados, pero sus consecuencias pueden minimizarse mediante la prevención.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albert, T. H. (2002). *Evaluation of remote sensing techniques for ice- area classification applied to the tropical Quelccaya ice cap, Peru*. Polar Geography, 26, n° 3, (pp. 210-226).
- Ames, A. (1998). *A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru*. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 34, pp. 1-36.
- Aniya, M.; Sato, H.; R. Naruse, R.; Skvarca, P. y Casassa, G. (1996). *The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Ice-field, South America*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62, n° 12, (p. 1361-1369).
- Bishop, M. P.; Kargel, J.; Kieffer, H.; MacKinnon, D.J.; Raup, B.H. y Shroder, J.F. (2000). *Remote-sensing science and technology for studying glacier processes in high Asia*. Annals of Glaciology, 31, pp. 164-170.
- Clague, J. J. y Evans, S. G. (2000). *A review of catastrophic drainage of moraine dammed lakes in British Columbia*. Quaternary Science Reviews, 19, pp. 1763-1783.
- Chuvieco, E. (1994). *Principios de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp. pp. 450.
- Chuvieco, E. (2002). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp, pp. 570.
- Dyrurgerov, M. (2002). *Glacier mass balance and regime: Data of measurements and analysis*. Occasional Paper N° 55. Boulder, CO: Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, pp. 268.
- Ericksen, G. E. y Plafker, G. (1970). *Preliminary Report on the Geologic Events Associated With the May 31, 1970, Peru Earthquake*. Geological Survey Circular, 639.
- Hansen, K. L. (1989). *GIS vs CAD vs DBMS em mapeamento digital: Exemplos em Engenharia Ambiental*. Congresso Brasileiro de Cartografia. Brasília - DF. Anais SBC.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2005). *Censos Nacionales 2005: X de Población y de Vivienda*.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. (2007). *Tutorial de geoprocessamento: segmentação de imagens*. Disponible en:
<<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentacao.html>> Accesado en: 25/ 05/ 2007
- Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA. (2007). *Informe comportamiento y estado actual de Pastorruri. Huaraz: Intendencia de Recursos Hídricos, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos*.

- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). *Climate Change*. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, pp. 18. Disponible en: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>> Accesado en 25/ 05/ 2007.
- Kääb, A. Wessels, R.; Haeberli, W.; Huggel, C.; Kargel, J. S. y Singh Khals S.J. (2003). *Rapid ASTER imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters*. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 84, pp. 117-21.
- Kieffer, H. H., et al. (2000). *New eyes in the sky measure glaciers and ice sheets*. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 81, pp. 270-71.
- Lillesand, T. y Kieffer, R. (1994). *Remote sensing and image interpretation*. New York: JOHN WILEY & SONS, (pp. 750).
- Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de Aplicação*. 3ª ed. Viçosa, UFV, pp. 320.
- National Aeronautics and Space Administration- NASA. (2007). Disponible en: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery-detail.asp?name=Huaraz>> Accesado en 12/07/2007
- Peru cámaras. (2007). Portal empresarial. Disponible en: <<http://www.perucamaras.com/publicaciones.htm>> Accesado en: 12/07/2007.
- Plafker, G.; Ericksen, G. E. (1978). *Nevados Huascarán Avalanches, Peru*. In: -VOIGHT, B. (ed.). *Rockslides and avalanches: natural phenomena*. New York: Elsevier. pp. 277-314.
- Richardson, S. D.; Reynolds, J. M. (2000). *An overview of glacial hazards in the -Himalayas*. Quaternary International, 65/66, pp. 31-47.
- Santiago, Y.; Soria, M.; Posada, E. y Guillen, J. (2004). *Estudio multitemporal del retroceso glaciar a través de imágenes de sensores remotos y SIG en la sierra Nevada del Cocuy, Cordillera Oriental de Colombia, periodo 1960 - 2003*. Santafé de Bogotá. Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Silverio, W. y Jaquet, J. (2005). *Aplicación de la Teledetección satelitaria para la estimación del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca Perú, entre 1987 y 1996*. Suiza: Universidad de Ginebra.
- Schowengerdt, R. A. (1997). *Remote Sensing: Models and Methods for Image --Processing*. New York: Academic Press.
- Tobin, G. A y Montz, B.E. (1997). *Natural hazards: explanation and integration*. New York: The Guilford Press. pp.338.
- Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E. y Morales Arnao, B. (1984). *El Niño-Southern Oscillation events as recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap*. Science, 22, pp. 50-53.
- United Nations Environment Programme - UNEP. (2007). *Global Outlook for Ice and Snow*. Disponible en: <http://www.unep.org/wed/2007/downloads/documents/Tunza%20Meltdown_FR.pdf> Accesado en 08/06/2007>
- United State Geological Survey - USGS. (2007). *Glacier Hazards*. Disponible en: <<http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/peru/hazards.html>> Accesado en 22/05/2007
- Vilimek, V., Zapata, M. L., Klimes, J., Patzelt, Z., y Santillan, N. (2005). *Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru*. Landslides, 2, pp. 107-115.