

Utilización de imágenes de mediana resolución espacial en el análisis multitemporal del sector sur del nevado Huascarán

Using medium spatial resolution images in the multitemporal analysis from southern sector of nevado Huascarán

Mauro Palomino¹

<http://dx.doi.org/10.21503/CienciayDesarrollo.2013.v16i1.03>

RESUMEN

Los cambios climáticos y el calentamiento global han tenido como consecuencia en las últimas décadas, una gran reducción de los casquetes glaciares en nuestro planeta, que se manifiesta por el retroceso de éstos. Las montañas andinas del Perú han perdido por lo menos 22% de su superficie glaciar desde 1970 y este deshielo está acelerándose año a año. Debido a su alta sensibilidad a las variaciones de temperatura, los glaciares tropicales se han convertido en los principales indicadores de los cambios climáticos. Las herramientas de percepción remota han sido ampliamente utilizadas para el monitoreo de glaciares. El uso de imágenes de satélite para determinar el área de deshielo de los glaciares se ha mostrado eficaz en los análisis multitemporales, a fin de extraer informaciones sobre la cubierta de nieve acumulada en el sector sur del nevado Huascarán, en particular en la cuenca hidrográfica del río Quillcay.

El objetivo del presente trabajo es realizar el inventario del deshielo glaciar ocurrido en la cuenca del río Quillcay, sector sur del nevado Huascarán (Perú), utilizando imágenes de mediana resolución espacial. Identificar los tipos de desastres ocurridos en la cuenca hidrográfica del río Quillcay que pueden ser desencadenados por el deshielo de los glaciares. Evaluar las técnicas de procesamiento digital de imágenes para la delimitación de los glaciares en los períodos 1988-2006, en el sector sur del nevado Huascarán.

La metodología del análisis comparativo de estimación de la superficie glaciar a partir del procesamiento digital de imágenes aportadas por los sensores TM 5 del satélite Landsat. Haciendo uso de composiciones en falso color de imágenes obtenidas a partir de índices espectrales para poder distinguir la nieve de otras cubiertas de la superficie terrestre y de las nubes.

Las imágenes fueron segmentadas y clasificadas utilizando el clasificador no-supervisado ISOSEG del software libre SPRING. Los principales resultados de la investigación quedan reflejados en el trabajo y responden a las expectativas previas al comienzo de la misma, por lo que el análisis de la información satelital constituye una vía para el estudio de las diferentes regiones del país, constituyéndose en el punto de partida para posteriores análisis temporales y en el monitoreo del deshielo de los glaciares tropicales. Es necesaria la adopción de medidas preventivas y mitigadoras en carácter de urgencia en la microcuenca del río Quillcay.

Palabras clave: *Deshielo glaciar. Análisis multitemporal. Percepción remota. Cambios climáticos.*

ABSTRACT

Climate change and global warming have resulted in recent decades, a large reduction in the polar ice on our planet, which is manifested by the retreating glaciers. Andean Mountains of Peru have lost at least

¹ Geógrafo, Consultor en Geotecnologías y Ordenamiento Territorial. Docente de la Universidad Alas Peruanas - Lima. e-mail: geomauro20@gmail.com

22% of their glacier area since 1970 and this melting is accelerating every year. Due to its high sensitivity to temperature variations, tropical glaciers have become key indicators of climate change. Remote sensing tools have been widely used for monitoring glaciers. The use of satellite images to determine the area of melting glaciers has been effective in multitemporal analysis in order to extract information on the cover of snow in the south of Nevado Huascarán, particularly in the watershed of Quillcay River. The aim of this study is to inventory the glacial melt occurred in Quillcay River Basin, southern sector Huascarán (Peru) using medium spatial resolution images. Identify the types of disasters in the Quillcay River basin that can be triggered by melting glaciers. Evaluate techniques for digital image processing delineation of glaciers in the periods 1988-2006, in the south of Nevado Huascarán. The methodology of comparative analysis of glacial surface estimation from digital image processing provided by sensors TM5 of Landsat using false color compositions of images obtained from spectral indices to distinguish other snow-covered land surface and clouds. The images were segmented and classified using the unsupervised classifier ISOSEG of free software SPRING. The main research results are reflected in the work and meet the expectations prior to the start of it, so that the analysis of satellite information is a way to study the different regions of the country, becoming the point of temporary basis for further analysis and monitoring the melting of tropical glaciers. It is necessary to adopt preventive measures urgently, in Quillcay River watershed.

Keywords: *Melting glacier, multitemporal analysis, remote sensing, climate change.*

INTRODUCCIÓN

Los glaciares 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 socio-económicas, lo que irá a limitar significativamente el desarrollo local. Pues, además de ofrecer agua potable para el consumo en las ciudades y la agricultura, también abastece agua para la generación de energía, a través de centrales hidroeléctricas, así como otros usos.

En América Latina los glaciares tropicales se encuentran en su mayor parte en la Cordillera de los Andes. El Perú posee 71 % de estos glaciares, los cuales vienen presentando un retroceso de 22% desde 1970. El deshielo acelerado ya amenaza a la captación de agua y energía para la costa árida del país, donde habitan dos tercios de la población peruana. El Quillcay,

considerada la mayor capa de hielo tropical del mundo, viene perdiendo cerca de 60 m por año y probablemente que desaparezca hasta el 2020. El Glaciar Pastoruri ya retrocedió 502 m, de acuerdo a las mediciones efectuadas de 1980 a 2006 (INRENA, 2007).

El Perú se encuentra permanentemente también expuesto a los impactos 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 Norte del Perú. Por ejemplo, hubo el desbordamiento de la Laguna Palcacocha, en año de 1941, situado en la Cordillera Blanca, que provocó un flujo de de-

tritos (*debris flow* o aluvión) destruyendo un tercio de la ciudad de Huaraz, causando la muerte de 5 000 personas; y las avalanchas ocurridas en el Nevado Huascarán en 1970, que desencadenaron grandes flujos de detritos, sepultando 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 ha sido tradicionalmente realizada con mediciones en campo. Entretanto, diversos problemas dificultan la realización de este abordaje, como el difícil acceso a los locales de mediciones, el costo de las campañas de colectas, las intemperies meteorológicas y, en algunos países, las políticas sensibles (ausencia de seguridad) que impiden la realización de las investigaciones. De esta forma, el sensoriamiento remoto se tornó en una de las principales herramientas para la evaluación del deshielo de los glaciares (Bishop et al., 2000; Dyrgerov, 2002; Kääb et al., 2003).

Una de las áreas en el Perú que actualmente está siendo monitoreado por la NASA es la laguna Palcacocha, que debido al deshielo del nevado 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, el que podría resultar en un desastre similar al ocurrido en Yungay en 1970. Así, se cree que

es necesario realizar un análisis del retroceso de los glaciares que están ubicados en la cuenca hidrográfica del río Quillcay, como forma de entender el comportamiento de los mismos para el establecimiento de medidas preventivas.

Área de estudio

El área de estudio está localizada en el sector sur del Huascarán, inserida en la cuenca hidrográfica del río Quillcay (Figura 1). Esa cuenca está localizada en las proximidades de la ciudad de Huaraz, capital del Departamento de Ancash, situada en la parte central del valle del río Santa.

Para dar cumplimiento a la investigación se determinó como **Objetivo general**:

Realizar el inventario del deshielo glaciar ocurrido en la cuenca del río Quillcay, sector sur del nevado Huascarán (Perú), utilizando imágenes de mediana resolución espacial; y como **Objetivos Específicos**:

1. Identificar los tipos de desastres ocurridos en la cuenca hidrográfica del río Quillcay que pueden ser desencadenados por el deshielo de los glaciares.
2. Evaluar las técnicas de procesamiento digital de imágenes para la delimitación de los glaciares en los períodos 1988-2006, en el sector sur del nevado Huascarán.

MATERIALES Y MÉTODOS

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, y 7). Resumidas en la Tabla 1.

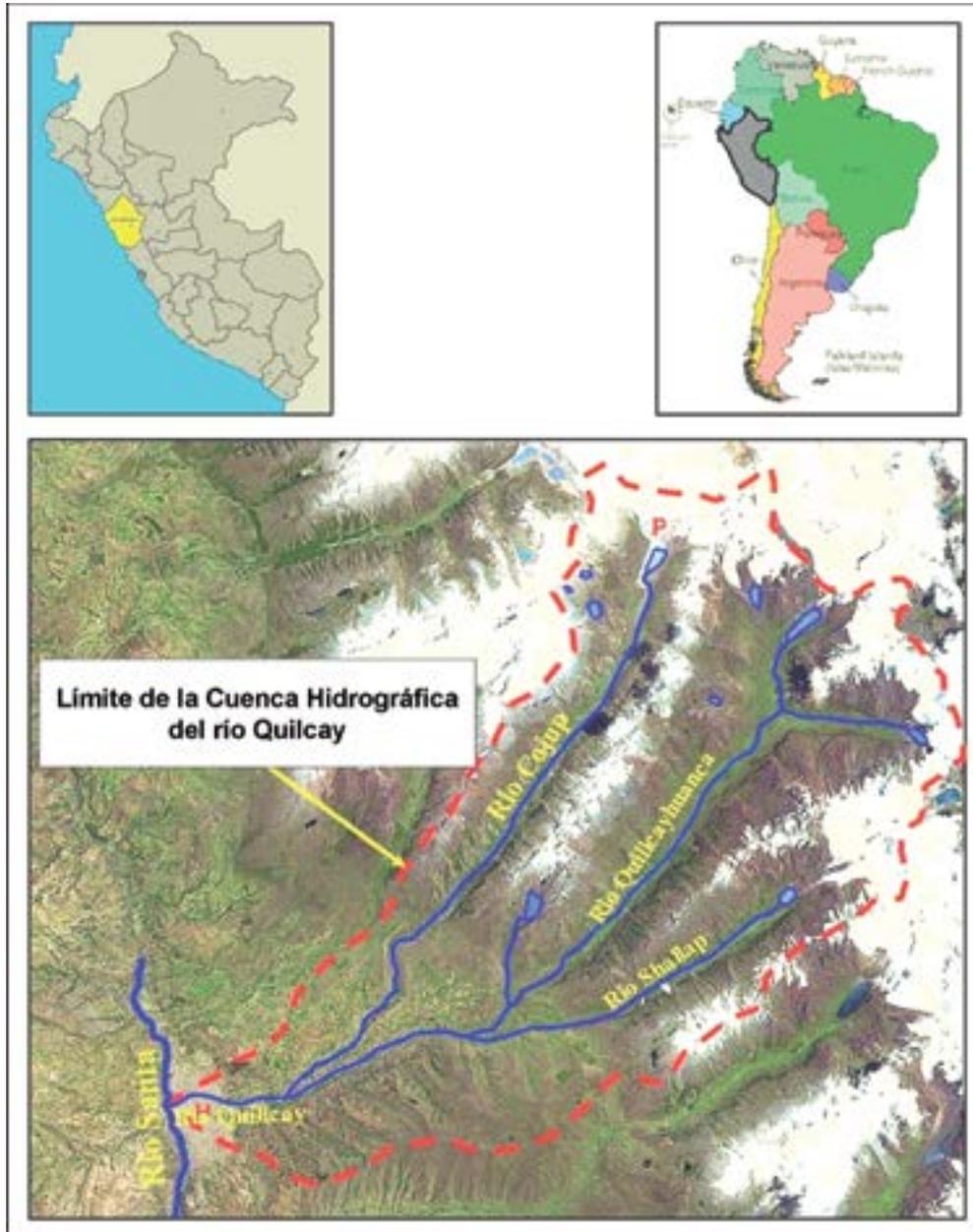


Figura 1. Localización del área de estudio

Fuente: adaptada de NASA (2012).

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

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	Nevsul 1 Nevsul 2 Nevsul 3	
Imagensensor	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	
Imagensensor	Imagen	Imagen segmentada	88-543seg1050-99 97-543seg1050-99 06-543seg1050-99	
Imagensensor	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 hielo; Laguna ; uso/cobertura hielo; Laguna ; uso/cobertura
Geológico	Temático	Imagen temática	Morrenas Fallas geológicas	G01-morrenas
Hidrografía	Temático	Imagen temática	Cuenca-Quillcay Ríos Landsat-tm	
Vías	Temático	Imagen temática	Principal Secundaria	
Límites	Catastral	Imagen temática	Areaurbana Dishuaraz Provincial Cap-prov	

- El aplicativo computacional utilizado fue el software libre SPRING.

* Las imágenes fueron facilitadas por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Brasil).

Métodos

El abordaje metodológico fue dividido 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 de 1988, 1997 y 2006.

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 y hace la combinación de diversos conjuntos de datos. Un sistema de BD es un programa computacional, normalmente, grande y complejo, que permite al usuario cambios de datos, actualizaciones, correcciones de errores, etc. El sistema opera con datos: numéricos, alfanuméricos, fechas entre otros. La BD posee lenguajes para descripción, manipulación de datos investigaciones de elementos espaciales de la información. Además, de eso provee herramientas de programación y posee estructuras particulares (Hansen, 1989).

Para la creación de la BD de este proyecto fue utilizado el aplicativo computacional del SPRING. Este sistema de Geoprocesamiento puede ser definido como un conjunto de herramientas envueltas al tratamiento de informaciones espaciales. Además de la generación de salidas en la forma de mapas convencionales, informes, archivos digitales, y otros. Promoviendo así, recursos para almacenamiento, gerenciamiento, manipulación y análisis de datos (INPE, 2012).

La BD en el SPRING almacena todas las definiciones de categorías de datos, que almacenarán los diversos tipos de mapas (PI's), y que por su vez son constituidas de las entidades geo-objetos y geo-campos (SPRING, 20012).

La BD Nevado Sur consta de un 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 Cartatema, Hidrografía, Geología, Vías y Límite, correspondientes al modelo de datos temático, fueron creadas en el proyecto, y los datos en formato ASCII para nuevos PI's en el proyecto Parque Sur. En el SPRING los datos fueron dispuestos en categorías y planos de información que pueden ser mejor visualizados en la Tabla 2.

Fueron creadas las categorías IMASENSOR e IMÁGENES, donde contenían los planos de informaciones referentes 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 del SPRING, resultando en archivos GRIB's (*Gridded Binary*) para los sensores TM (bandas 3, 4 y 5) de los años 1988, 1997 y 2006, respectivamente.

Las imágenes fueron traídas del IMPIMA para dentro del proyecto con la resolución espacial de los píxeles de 30 metros. Este procedimiento tenía como objetivo hacer la integración de las imágenes de los sensores TM para la obtención de los cambios ocurridas en 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.

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 en la figura 2.

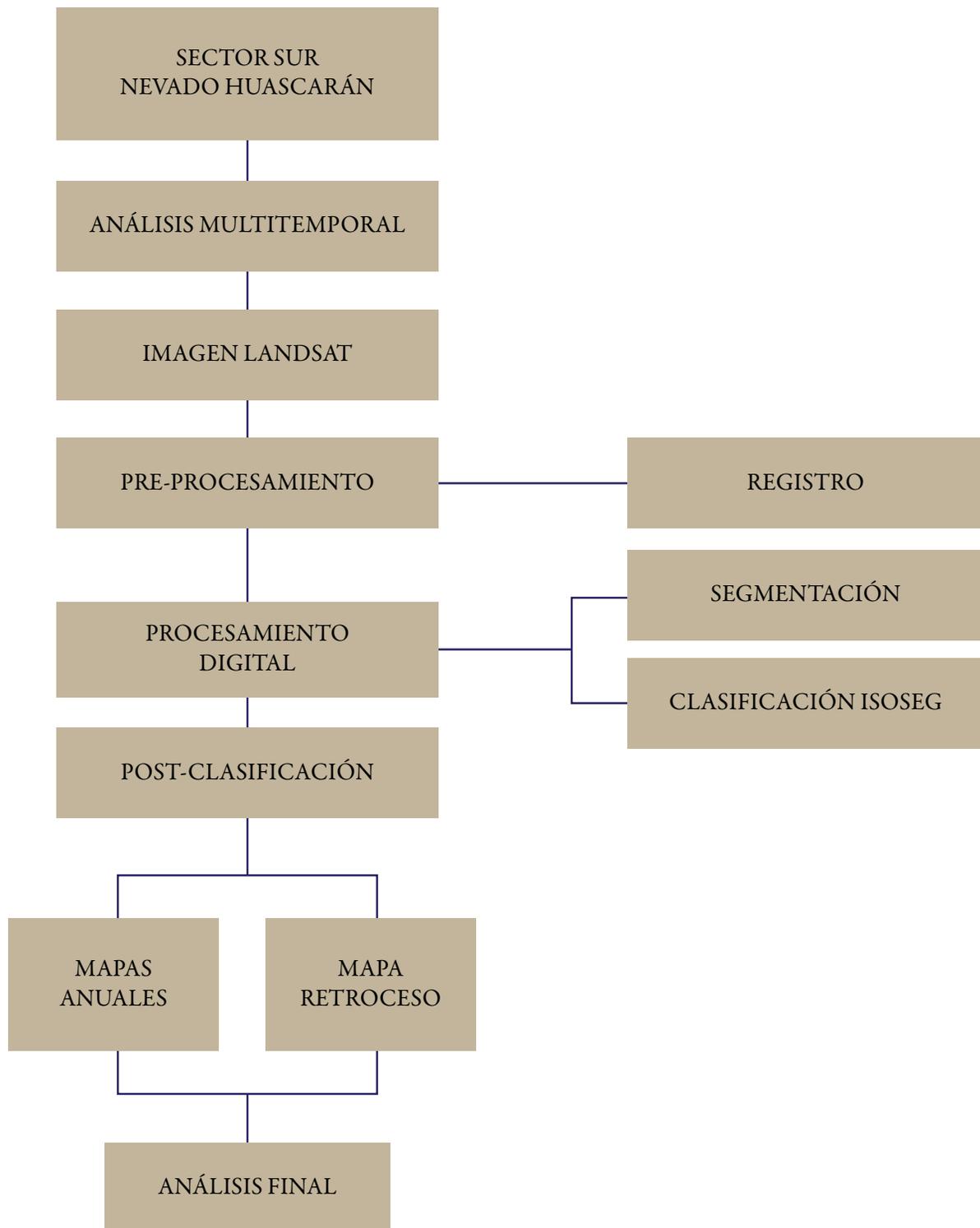


Figura 2. Flujograma del trabajo propuesto

Descripción de las etapas

a. Pre-procesamiento

Es la preparación de los datos provenientes de las imágenes de satélites para la clasificación. Estas técnicas son empleadas con el objetivo de mejorar la cualidad de los datos, siendo las más utilizadas la reducción de ruidos, la rectificación geométrica, el registro y la reducción de la dimensionalidad (Moreira, 2005).

En este trabajo, primero fue realizado el recorte del área de estudio, para posteriormente realizar el registro de 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 formación de la misma, por el sistema sensor y por la imprecisión de los datos de posicionamiento de la plataforma (Chuvieco, 2002).

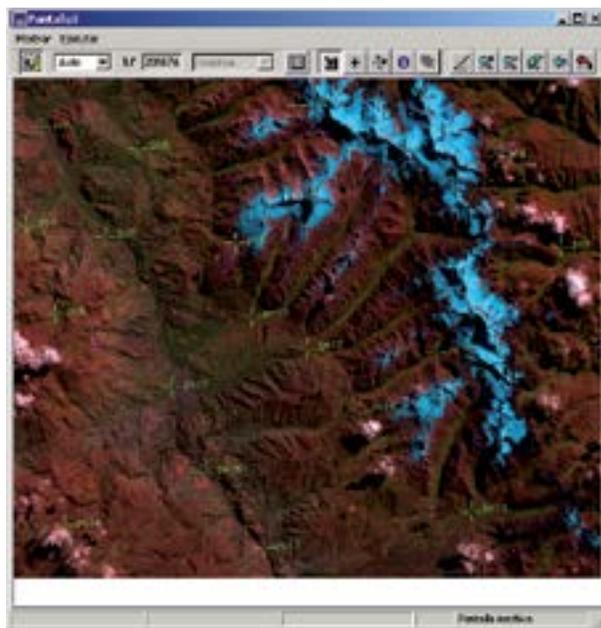


Figura 3. Puntos de control utilizados para el georreferenciamiento de las imágenes LANDSAT

Así las imágenes del sensor TM do 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 3 son presentados los puntos de control utilizados en el georreferenciamiento de las imágenes para todas las fechas analizadas.

Después, fue realizada una selección de las bandas que fueron utilizadas en el mapeamiento del deshielo de los glaciares. Esta selección es basada en la literatura pertinente, seguida de evaluación visual. Esa evaluación implica un conocimiento previo del área de estudio, que facilita la identificación de los elementos y en el tipo de procesamiento digital que serán adoptados.

b. Procesamiento digital de imágenes

En esta etapa fue aplicada la técnica de realce de contraste que tiene por objetivo mejorar la calidad de las imágenes visando la mejor identificación de los elementos de la escena por el ojo humano.

c. Clasificación y mapeamiento de la imagen

La clasificación digital consiste básicamente en seleccionar un conjunto de píxeles de los elementos que compone la imagen. Así, es posible dividir los elementos en clases temáticas previamente definidas por el usuario, por lo tanto son utilizados los clasificadores supervisados. En cuanto que, en otros casos, las reglas de decisión son definidas automáticamente por el clasificador, llamados de clasificadores no-supervisados (Chuvieco, 1994).

En este trabajo se utilizó un clasificador por región no-supervisado, ya que los glaciares presentan una reflectancia relativamente homogénea (hielo/nieve) y con excelente contraste en relación a los elementos vacíos (suelo/roca). Albert (2002) evaluó diversos clasificadores en el neva-

do de Quellcaya en la parte sur de los Andes Peruanos. El autor verificó que el clasificador ISO-DATA presentó una acuracidad (exactitud) encima de 90%. Aniya et al. (1996) también adoptó el ISODATA para mapear la capa de hielo de la región de la Patagonia. Entre tanto, como en el software SPRING no ofrece este clasificador, fue utilizado un clasificador con especificaciones similares, el ISOSEG (SPRING, 2012). Los pasos adoptados serán descritos a continuación:

- **Segmentación de la imagen:** El clasificador separa un agrupamiento de píxeles en regiones homogéneas, adoptando valores estadísticos de similariedad. Después de realizar algunos tests de similariedad, se optó por segmentar las imágenes de 1988, 1997 y 2006 utilizando valores de Similariedad = 10 y Área = 50. En la Figura 4 es presentado un ejemplo de segmentación utilizando como base la composición colorida 543 (RGB).

- **Clasificación de la imagen:** antes de realizarse la clasificación de la imagen segmentada se establece un limiar (borde) de aceptación para la definición de las clases. 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 las propiedades espectrales y espaciales de imágenes. La información del borde es utilizada inicialmente para separar las regiones y las propiedades espaciales y espectrales que irán a unir áreas con la misma textura (SPRING, 2012).

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 son ca-

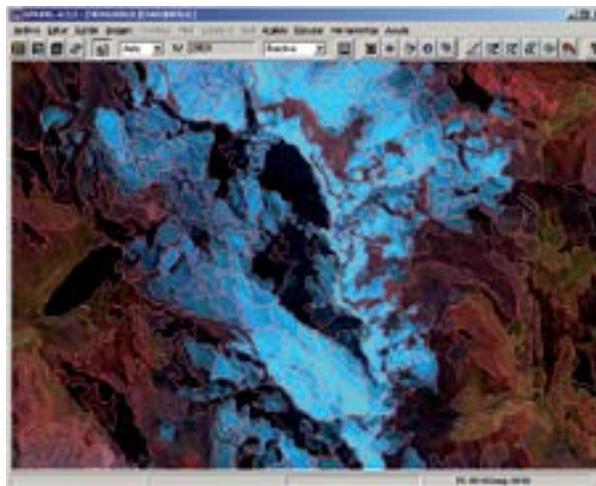


Figura 4. Ejemplo de imagen segmentada

racterizadas por 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 para clasificación que procura agrupar regiones, a partir de una medida de Similariedad entre ellas. La medida de Similariedad utilizada consiste en 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: la matriz de covarianza y el vector de media, para estimar el valor central de cada clase (SPRING, 2012). Fueron testados 4 limiares (bordes) de aceptación (99, 95, 90 y 75) para las escenas de los años 1988, 1997 y 2006. El limiar (borde) de aceptación adoptado fue el 99% porque respetaba más la forma del glaciar permitiendo realizar un mapeamiento con mayor precisión. En la Figura 5 es presentado un ejemplo de imagen clasificada utilizando el clasificador ISOSEG. Ante todo el clasificador generó 9 clases que fueron analizadas y renombradas como: “morrena”, “glaciares”, “Lagunas”, “ríos”, “nubes”, “sombra”, “escarpa”, “suelo expuesto”, “pasto natural” y “área urbana”. (SON DIEZ)

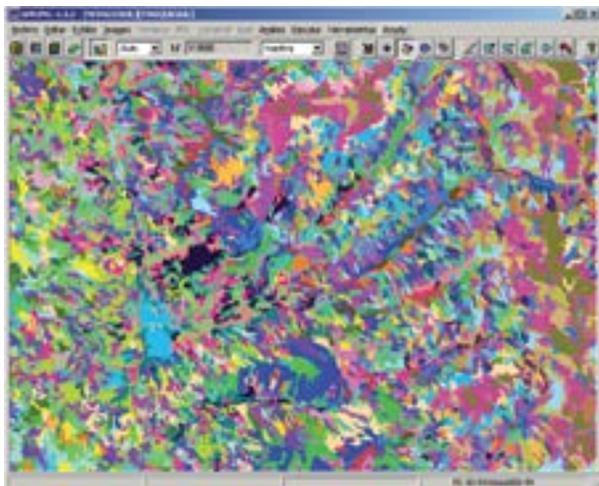


Figura 5. Ejemplo de imagen clasificada con ISOSEG

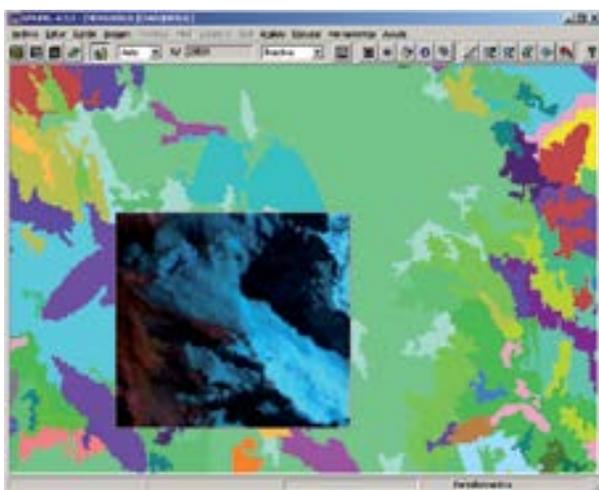


Figura 6. Proceso de reclasificación, composición de la imagen con las bandas 543 (RGB) de fondo

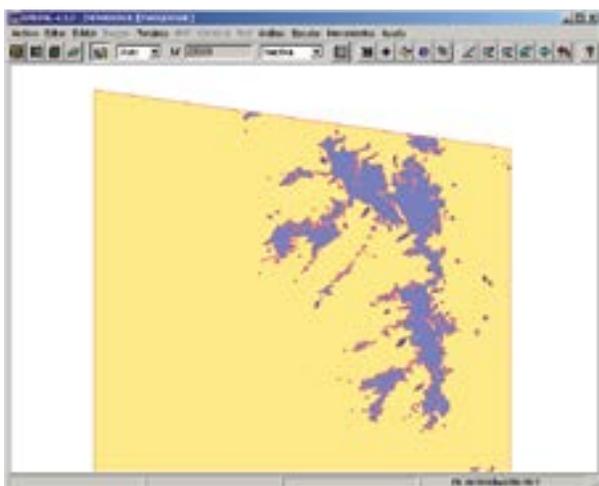


Figura 7. Resultado final del mapeo de clases

- **Pos-clasificación:** en este momento, con el objetivo de mejorar el resultado, el usuario pasa a intervenir directamente en el proceso, a través de la eliminación de clases aisladas o junción de clases. La clasificación presentó un número grande de clases, que fueron agrupadas en 4:

“morrena”, “glaciares”, “Lagunas”, “uso/cobertura”. Para realizar ese agrupamiento, la clasificación fue confrontada con la composición colorida 543 (RGB) que quedaba de fondo (Figura 6). De esta forma, el usuario puede hacer la reclasificación de la imagen.

- **Mapeo:** momento en que la imagen clasificada (Categoría Imagen) es transformada en un mapa temático raster (Categoría Temático). El mapeamiento temático, del uso de la tierra Parque Sur, fue realizado teniendo como definición las clases: “morrena”, “glaciares”, “Lagunas”, “uso/cobertura”. En la Figura 7, se puede observar el resultado final del mapeamiento de clases para el año 2006.

RESULTADOS

Análisis del retroceso en los años 1988, 1997 y 2006

Con relación a las fechas de mapeamiento, se optó por fechas con un intervalo de 9 años entre sí. Conforme se ha verificado en los Trabajos de Georges (2004), Quincey et al. (2005), Silverio y Jaquet (2005) y Vilimek et al. (2005), 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 nevado Huascarán y las lagunas de origen glaciar de la cuenca hidrográfica del río Quillcay. A través del método de clasificación ISOSEG fue posible diferen-

ciar y separar con bastante eficiencia las áreas de glaciares y lagunas de los demás elementos presentes en la escena, principalmente para esta área en destaque. En la Figura 8, 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).

Para el año 1997, conforme Figura 9, se observa un incremento significativo de las lagunas Palcacocha (2,86 ha.) y Tullpacocha (11,7 ha.) en relación al año de 1988. Además de eso, los límites de los glaciares también presentaron un retroceso acentuado, tanto que algunos puntos aparecen como área de deshielo (flecha roja) que no fueron identificadas en la imagen de 1988.

El incremento del área de las Lagunas y disminución del área de los glaciares fue aún más acentuado en el año de 2006 (Figura 10). Lo que llamó la atención en esta área, en relación a 1988 y 1997, fue el aumento del área de la laguna Palcacocha, que presentó 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 variación tan expresiva como el Palcacocha para esos 18 años de análisis. Además de eso, hubo una disminución significativa de las áreas de glaciares. Por ejemplo, un segmento de glaciar que separa el área de deshielo en 1997 de la área de valle desapareció completamente, mostrando un avance del deshielo en las áreas mas bajas (flecha amarilla), que corresponde a las áreas de fondo de valles. Se cree que fue principalmente las aguas de ese deshielo que vino a alimentar la laguna Tullpacocha.

En las tablas 3 y 4 se puede observar el cambio severo que ocurrió en las lagunas Palcacocha y Tullpacocha en el periodo 1988 - 2006. Es interesante notar que a pesar de quedar con tamaños semejantes, tanto el área cuanto el perímetro de

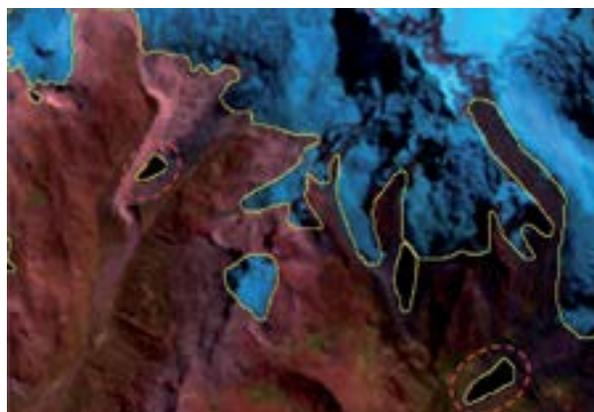


Figura 8. Delimitación de las áreas de glaciares y lagunas de la cuenca del río Quillcay para el año 1988

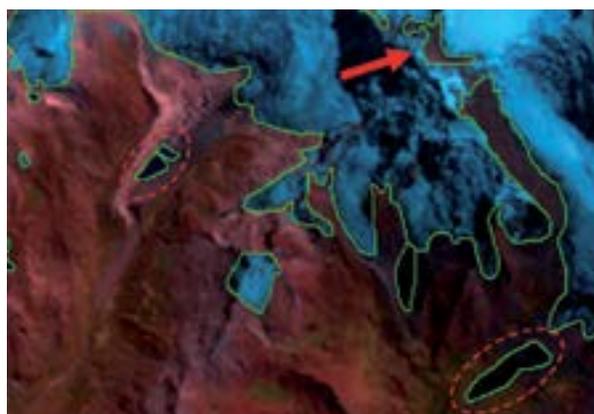


Figura 9. Delimitación de las áreas de glaciares y lagunas de la cuenca del río Quillcay para el año 1997

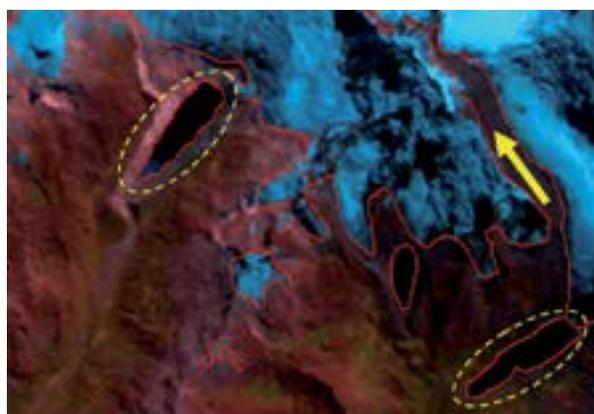


Figura 10. Delimitación de las áreas de glaciares y Lagunas de la cuenca del río Quillcay en 2006

la laguna Palcacocha aumenta considerablemente en la última década. Esto viene a confirmar la preocupación de la NASA en estar monitoreando esta laguna con imágenes del sensor AS-

TER. Este aumento considerable en el volumen del agua pone en riesgo toda la población de la ciudad de Huaraz. Ya se configura en una situación similar a la ocurrida en Yungay. En caso de que ocurra un terremoto fuerte en la región, es posible que el dique existente venga a romperse, produciendo un violento flujo de agua, hielo y roca pendiente abajo que podría enterrar parte de la ciudad de Huaraz, que resultaría en un gran

número de víctimas fatales. Es interesante resaltar que para ambas lagunas el mayor incremento del área ocurrió en la última década. Esto viene a confirmar las observaciones realizadas por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que comenta 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 periodo 1988 - 2006

Año	Área (ha.)	Perímetro (km)	Incremento			
			Área (ha.)	Perímetro (km)		
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 periodo 1988 - 2006

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

A través de la Figura 11 se puede observar con más claridad el incremento de las lagunas glaciares localizados dentro de la cuenca hidrográfica del río Quillcay, así como la disminución de las áreas de los glaciares correspondientes al sector sur del nevado Huascarán para el periodo 1988-2006, donde el color amarillo corresponde al año 1988, el verde al año 1997 y el rojo al año 2006.

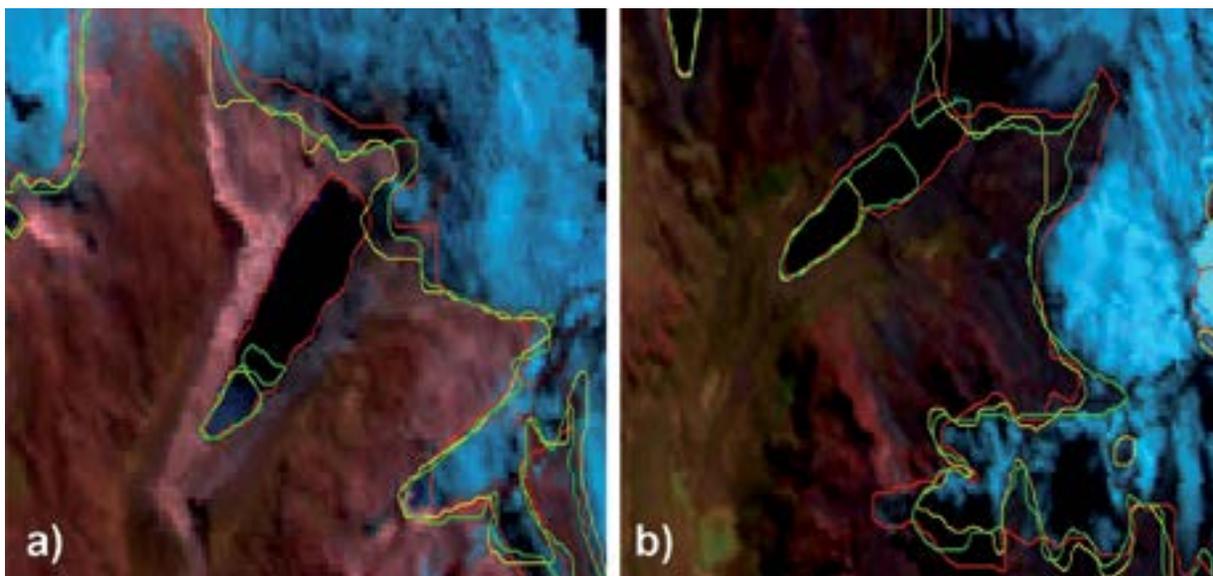


Figura 11. Incremento de las lagunas y disminución de los glaciares en la cuenca del río Quillcay periodo 1988 - 2006

Proyección de escenarios futuros

Teniendo como base los datos del 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 nevado Huascarán. Esta proyección visa estimar el deshielo para 2013, osea, corresponderá a un periodo total de 25 años, tomando como partida el año de 1988.

Inicialmente se obtuve 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. Después, se utilizó el método de interpolación aritmética establecido por Posada et al. (2004), que consiste en la siguiente fórmula:

$$P_x = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{n} * t \quad (1)$$

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 obtienen el siguiente resultado:

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

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

En la Tabla 5, es realizada la comparación con los demás años analizados y obtenido el incremento del retroceso glaciar para 2013. Nótese, a través de esta tabla, que los glaciares continuaron sufriendo pérdidas significativas en la 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. No en tanto, conforme IPCC (2007), los modelos climáticos tienen apuntado para pérdidas significativas da extensión de hielo de los glaciares de montaña en las regiones tropicales. Si las tasas de deshielo continuaran en esta proporción, es muy probable que para las próximas décadas algunos glaciares de montañas tropicales puedan dejar de existir.

Tabla 5. Retroceso glaciar en el periodo 1988 – 2013 por el método de interpolación aritmética

Año	Área (ha.)	Perímetro (km)	Retroceso glaciar (ha.)	
1988	18333,32	647,09	722,26	630,82
1997	17611,06	682,98		
2006	16980,24	233,61	760,86	
2113	16219,38			

CONCLUSIONES

La metodología adoptada se presentó eficiente, con resultados satisfactorios, y puede fácilmente ser adaptada para Imágenes de otros sensores ópticos, como ASTER y CBERS. Además de eso, se puede también verificar que las técnicas de sensoriamiento remoto asumen un papel im-

prescindible en el monitoreo y mapeamiento de los glaciares de montaña, como los encontrados en la Cordillera Blanca.

Los resultados obtenidos demuestran que durante el periodo 1988-2006 hubo un incremento significativo de las lagunas Palcacocha y Tullpacocha y la disminución del glaciar del sector sur

del Nevado Huascarán, ambos localizados en la cuenca hidrográfica del río Quillcay. Esta variación tanto en el tamaño de las lagunas en cuanto de los glaciares puede estar directamente relacionado con el calentamiento global, principalmente cuando se compara las tasas de deshielo y el aumento de temperatura en la última década, considerada la más caliente desde 1850.

Esta tendencia está siendo observada por otras investigaciones científicas realizadas en otros glaciares andinos, con destaque para aquellos localizados en la zona tropical. Casi todos los monitoreos futuros proveen que las tasas de deshielo continúan aceleradas, es posible que a mediados de este siglo muchos glaciares de montaña puedan ya desaparecer.

La laguna Palcacocha se presenta hoy como un peligro potencial para la ciudad de Huaraz, colocando en elevado riesgo a la población local.

RECOMENDACIONES

Es necesario que sean adoptadas medidas estructurales con urgencia no solo en el dique que está represando la laguna, sino también en los cauces del río que atraviesa las áreas más densamente ocupadas. También es fundamental que se realice un mapa de las áreas de riesgo de la cuenca del río Quillcay, con la debida concientización de la población, así como desarrollar sistemas de alerta y áreas de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

1. 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, p. 210-226.
2. ANIYA, M, 1996. et al. 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.
3. BISHOP, M. P. 2000. et al. Remote-sensing science and technology for studying glacier processes in high Asia. *Annals of Glaciology*, 31, p. 164–170.
4. CHUVIECO, E. 1994. Principios de Teledetección Espacial. Madrid: Rialp.
5. CHUVIECO, E. 2002. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: Rialp, 570p.
6. DYURGEROV, 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, 268 p.
7. ERICKSEN, G. E.; PLAFKER, G. 1970. Preliminary Report on the Geologic Events Associated With the May 31, 1970, Peru Earthquake. *Geological Survey Circular*, 639.
8. HANSEN, K. L. 1989. GIS vs CAD vs DBMS em mapeamento digital: Ejemplos em Engenharia Ambiental. Congresso Brasileiro de Cartografia. Brasília – DF. Anais SBC.
9. INPE – Instituto Nacional de Investigaciones Espaciais. 2012. Tutorial de geoprocessamento: segmentación de Imagenes. Disponible em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentacao.html>> Acesso em: 25/ 05.
10. INRENA-UGRH. 2007. Informe comportamiento y estado actual de Pastoruri. Huaraz: INRENA-UGRH.
11. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Disponible em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>> Acesso em 25/ 05/ 2007.
12. KÄÄB, A., et al. Rapid ASTER imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 84, p. 117–21, 2003.
13. MOREIRA, M.A.2005: Fundamentos do Sensoriamento remoto e metodologías de aplicación. 3ª ed. Viçosa, UFV, 320p.
14. SANTIAGO, Y.; SORIA, M.; POSADA, E. e GUILLEN, J. Estudio multitemporal del re-

troceso 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. 2004.

15. SILVERIO, W. ; JAQUET, J. M. Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, 95, p. 342–350, 2005.
16. USGS – United State Geological Survey. Glacier Hazards. Disponivel em: <<http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/peru/hazards.html>> Acceso em 22/06/2012

Correspondencia:

Mario Palomino

geomauro20@gmail.com