

Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa (Perú)

Tatiana Quirós Carrera

**Trabajo de Fin de Grado
Geografía y Ordenación del Territorio
Universidad Complutense de Madrid**



Tutor:

Profesor Doctor David Palacios Estremera

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física UCM

Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña (GFAM)

Director:

Doctor Jose Úbeda Palenque

Guías de Espeleología y Montaña



JUNIO 2013

INDICE

1. INTRODUCCION.....	3
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Encuadre geográfico.....	5
1.3 Geología y geomorfología.....	8
1.4 Clima.....	9
1.5 Evolución de los glaciares en los Andes Centrales y sus implicaciones climáticas.....	12
2. METODOLOGIA.....	14
2.1 Delimitación de glaciares actuales (2010) y de morrenas.....	14
2.2 Reconstrucción de paleoglaciares de la PEH.....	16
2.3 Cálculo de superficies y de ELAs AABR 2010 y PEH.....	18
2.4 Tasas de deglaciación para la elaboración de pronósticos sobre la evolución de los glaciares.....	22
2.5 Cálculo del calentamiento desde la PEH	23
3. RESULTADOS.....	24
3.1 Delimitación de glaciares, morrenas y paleoglaciares.....	24
3.2 Superficie glaciar en 2010 y en la PEH.....	26
3.3 ELAs de glaciares 2010 y paleoELAs PEH y tasa de enfriamiento.....	27
3.3.1 ELAs AABR 2010.....	27
3.3.2 ELAs AABR de los paleoglaciares PEH.....	29
3.3.3 Enfriamiento durante la PEH.....	29
3.4 Elaboración de tendencias sobre la evolución de los glaciares.....	30
4. DISCUSION.....	34
4.1 Superficies y ELAs de los glaciares y paleoglaciares y el cálculo del enfriamiento durante la PEH.....	34
4.2 La cronología de la PEH.....	37
4.3 Evolución de los glaciares y posibles escenarios.....	40
4.3.1 Aportaciones de las actividades antrópicas al cambio climático.....	41
4.4 Planificación glaciológica nacional.....	42
Conclusiones.....	43
REFERENCIAS.....	46
ANEXOS	
Glosario glaciológico y climatológico.....	44
Mapa Hidrográfico del Perú.....	48
Mapa de Unidades Hidrográficas del Perú.....	49
Mapa de localización de acuíferos.....	50

1. INTRODUCCION

Los glaciares tropicales constituyen una reserva estratégica para el abastecimiento de agua, y también son indicadores muy sensibles de las variaciones del clima. Además, el desagüe de las lagunas glaciares representa una importante amenaza para la población y sus actividades económicas (Kaser y Osmaston, 2002), además de un reto para el Plan de Control Hidrológico.

Hoy en día, los estudios sobre glaciares son uno de los principales indicadores empleados para evaluar los cambios del clima, el Observatorio de Cambio Climático del Perú, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), el Observatorio Mundial del Clima (WCO) o el Sistema Mundial de Observación del Clima (GCOS). Sin embargo, la mayoría de estudios glaciológicos, por diversas razones, se han realizado en glaciares de regiones polares y subpolares y muy pocos sobre glaciares tropicales (Figura 1).

En el presente trabajo se han utilizado los programas Google Earth, ArcGis y Excel para analizar el estado de los glaciares actuales y los glaciares de la Pequeña Edad del Hielo mediante dos indicadores clave: el área, en km^2 y la altitud de la línea de equilibrio (ELA), en metros, deducida de la topografía de un conjunto de glaciares, que (Úbeda, 2011) denominó ELA geomorfológica. La ELA es una isolínea que separa, de forma teórica, la zona superior de un glaciar, donde predominan los procesos de ganancia de masa (innivación, precipitación, etc.) de la zona inferior, donde predominan los procesos de pérdida de masa (ablação y sublimación).

Ambos indicadores (superficies y ELAs) han permitido caracterizar el estado de las masas de hielo en el año 2010 y durante la última Pequeña Edad del Hielo (PEH), la última etapa fría reconocida a nivel mundial.

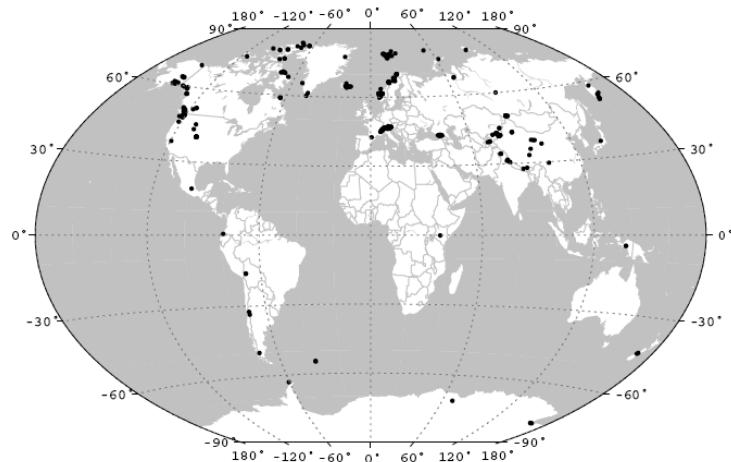


Figura 1: Localización de los lugares donde se han realizado reconstrucciones de ELAs glaciológicas durante la segunda mitad del siglo XX (Dyurgerov, 2002).

El objetivo es el estudio de un conjunto de glaciares localizados en las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa, en los Andes Centrales del departamento de Lima (Perú). Los glaciares fueron elegidos, de forma estratégica, por ubicarse entre otros nevados en latitudes periféricas y valorados con la misma metodología que la empleada en este trabajo: Nevado Hualcán en la Cordillera Blanca ($10^{\circ}10'S$) (Giráldez, 2011), ~300-400 km hacia el norte, y el Nevado Coropuna ($13^{\circ}33'S$) (Úbeda, 2011) ~600 km hacia el sur. De este modo se ha contribuido a la generación de un transecto N-S de la cordillera de los Andes Centrales.

Actualmente, Pariaqaqa y Chollquepucro forman parte de la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochas (RPNYC), creada bajo Decreto Supremo N°033-2001-AG el 01 de mayo de 2001 y con una extensión de 221.268,48 Ha. Pariaqaqa en quechua significa ‘dios del agua’ y fue un símbolo sagrado para las culturas prehispánicas (Arguedas, J.M., 1996). Sus aguas anuales, por precipitación y deshielo, representan una parte importante de las reservas hídricas disponibles para la población de la costa peruana y sus actividades económicas, incluyendo agua potable, riegos y producción de energía eléctrica.

1.2 Objetivos

El objetivo general es evaluar los impactos del calentamiento global en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa. Para ello, se pretenden alcanzar los siguientes objetivos específicos:

Objetivos específicos:

1. Delimitar y medir la superficie de los glaciares actuales (2010) y reconstruir sus ELAs.
2. Cartografiar las morrenas que por su contexto geomorfológico puedan ser atribuídas a la PEH para que, con ello, se reconstruya la superficie paleoglaciada y sus respectivas ELAs.
3. Calcular la variación de temperatura desde el final de la etapa del último avance glacial (PEH) hasta el presente. Luego, contrastarla con las estimaciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC).
4. Definir tasas de deglaciación desde la PEH hasta 2010 en base a la reducción de superficie ($m^2/año$) y a la variación de la ELA (m) de los glaciares actuales con respecto a los paleoglaciares.
5. Elaborar pronósticos sobre la desaparición de los glaciares utilizando como indicadores las tasas de deglaciación calculadas en el objetivo número 4.

1.2 Encuadre Geográfico

Las montañas Pariaqaqa y Chollquepucro forman parte de la cordillera Pariaqaqa, que se encuentra en los Andes Centrales peruanos, en la divisoria de las vertientes del Pacífico (Departamento de Lima), al oeste, y el Amazonas (Departamento de Junín), al este.

La Cordillera Pariaqaqa se extiende de NO a SE entre las latitudes $11^{\circ}57'29''$ y $12^{\circ}00'18''$ S y las longitudes $76^{\circ}04'12''$ y $75^{\circ}58'16''$ W. Aunque la Cordillera completa se extiende a lo largo de 30 km, el área de estudio se reduce a 12 km de largo, desde el extremo sur del pico de Pariaqaqa (5.750 m), hasta la laguna Cana, al norte de Chollquepucro (5.650 m) (Figura 2).

Las montañas estudiadas se localizan dentro de las provincias de Huarochiri, y de Yauyos en el departamento de Lima, a 147km al E del área metropolitana y según la clasificación del Centro de Datos para la Conservación de la Universidad Agraria La Molina (CDC, 1991) el área de estudio pertenece a la región biogeográfica de Puna Tropical (3200- 6746 m) (Figura 3b).

Las aguas del deshielo de los glaciares estudiados (fachada occidental de la Cordillera) se dirigen hacia el Océano Pacífico alimentando tres cuencas hidrográficas en la región de Lima, la de los ríos Cañete, Mala y Rímac (Figura 3a).



Figura 2: Perfil topográfico de la cordillera Huarochiri, en el que destacan el pico Pariaqaqa en el extremo sur, la quebrada y la laguna glaciar Mullucocha (entre Pariaqaqa y Chollquepucro) y la montaña Chollquepucro (en el centro) seguida de la laguna Cana, en el extremo norte.

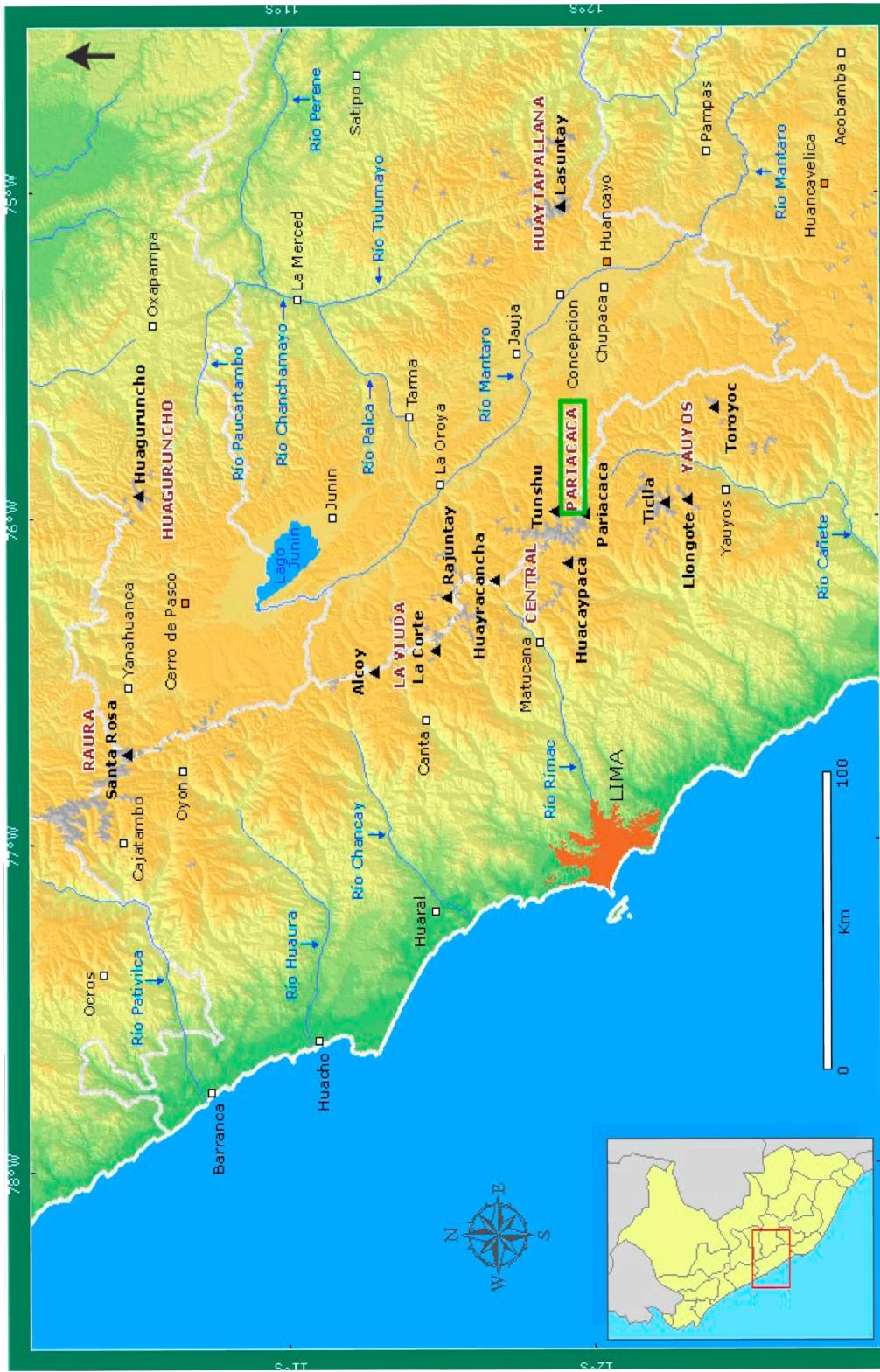


Figura 3a) Picos de la Cordillera Central: Raura, al N; Huaguruncho, al NE; La Viuda; Central; Pariaqaca (enmarcado en color verde); Yauyos, al S y Huatapallana, al E.

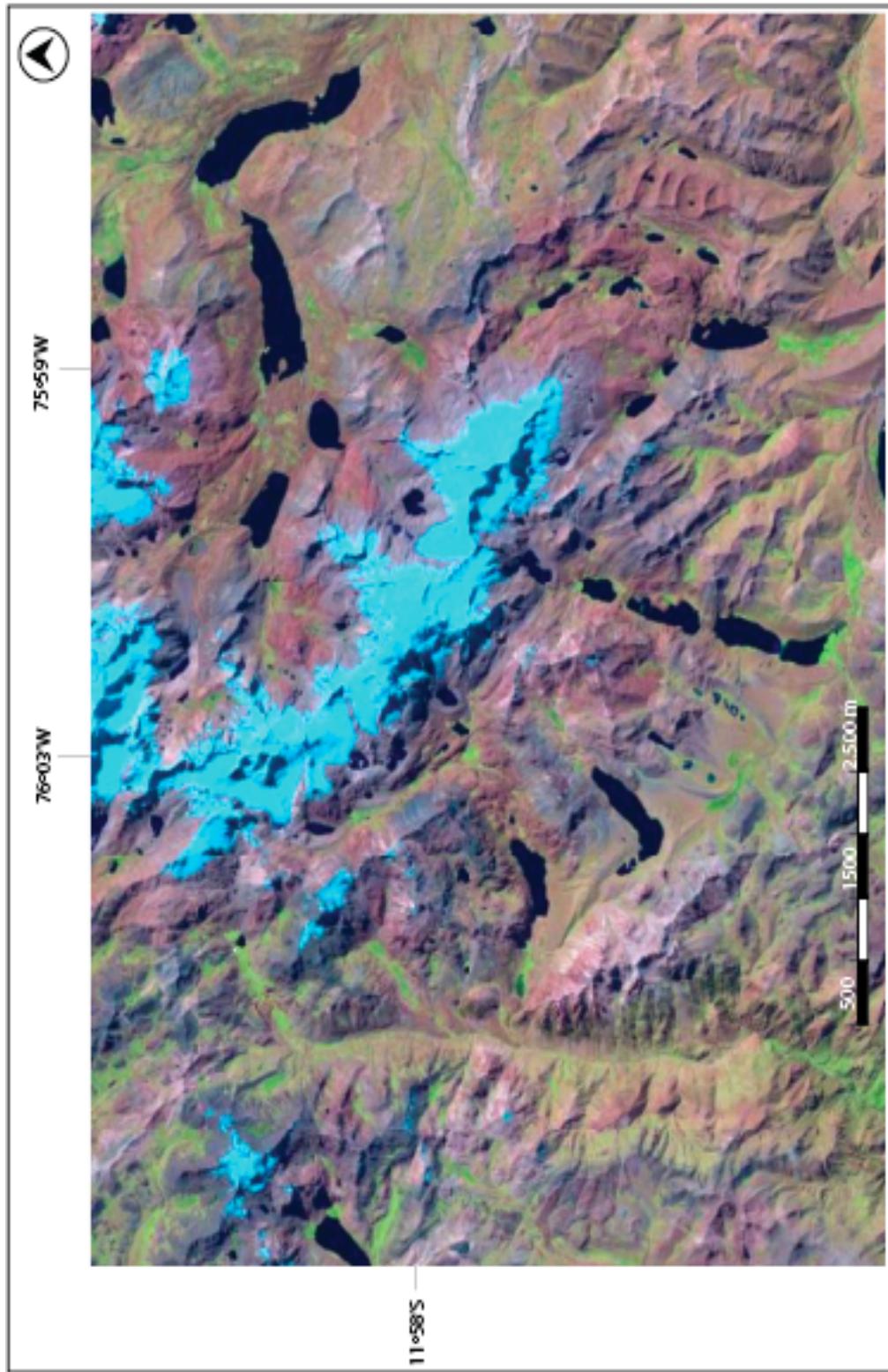


Figura 3b) Imagen Landsat 1997 de la Cordillera Pariaqaqa, en Huarochiri en la que pueden distinguirse las cumbres cubiertas de hielo y nieve (en color azul) y las lagunas glaciares (en color oscuro).

1.3 Geología y geomorfología

La cordillera Pariaqaqa se debe también, al igual que la Cordillera de los Andes, al levantamiento tectónico causado por la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental sudamericana (figura 4). En las latitudes de la zona estudiada la subducción es bastante plana (5° a 10°), mientras que en otros sectores de la Cordillera el ángulo de subducción es mayor ($>20^{\circ}$). A causa de este menor ángulo de subducción, el área carece de erupciones volcánicas durante el período Cuaternario, que sí han ocurrido en los sectores de mayor inclinación (Úbeda, 2011).



Figura 4: Placas tectónicas que dan origen a la Cordillera de los Andes (Úbeda, 2011), modificado de (Strahler & Strahler, 1989).

Como consecuencia del proceso de subducción, la erosión fluvial y glaciar la topografía es muy accidentada, alternando cumbres elevadas y valles profundos. El relieve ha sido modelado por la erosión glaciar sobre una estructura anticinal que buza suavemente en sentido oeste. La litología está relacionada con las transgresiones y regresiones marinas y la actividad volcánica producida durante los períodos Mesozoico y Cenozoico, respectivamente. También ha influido la erosión diferencial de las rocas, que según la cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero del Perú, se clasifica en los siguientes grupos (figura 5):

1. **Ki-chp:** arcillas calcáreas, lodolitas y areniscas con calizas. Formación Chulec, Pariahuanca del Cretácico Inferior. Se corresponde a la línea de cumbres.
2. **Q-g:** grava, arena y matriz fina. Formación de depósitos glaciares del Cuaternario. Se formaron en las áreas intramontañosas y también en las partes más bajas del relieve actual.
3. **Ki-g:** limolitas, areniscas y conglomerados. Formación Goyllarisquizga del Cretácico Inferior. Es una única formación al pie de laderas occidentales y en formaciones concretas.
4. **Tm-m:** andesitas, dacitas, riodacitas y piroclásticos. Formación volcánica Rímac del Oligoceno Oligoceno. Se formaron sobre valles occidentales.

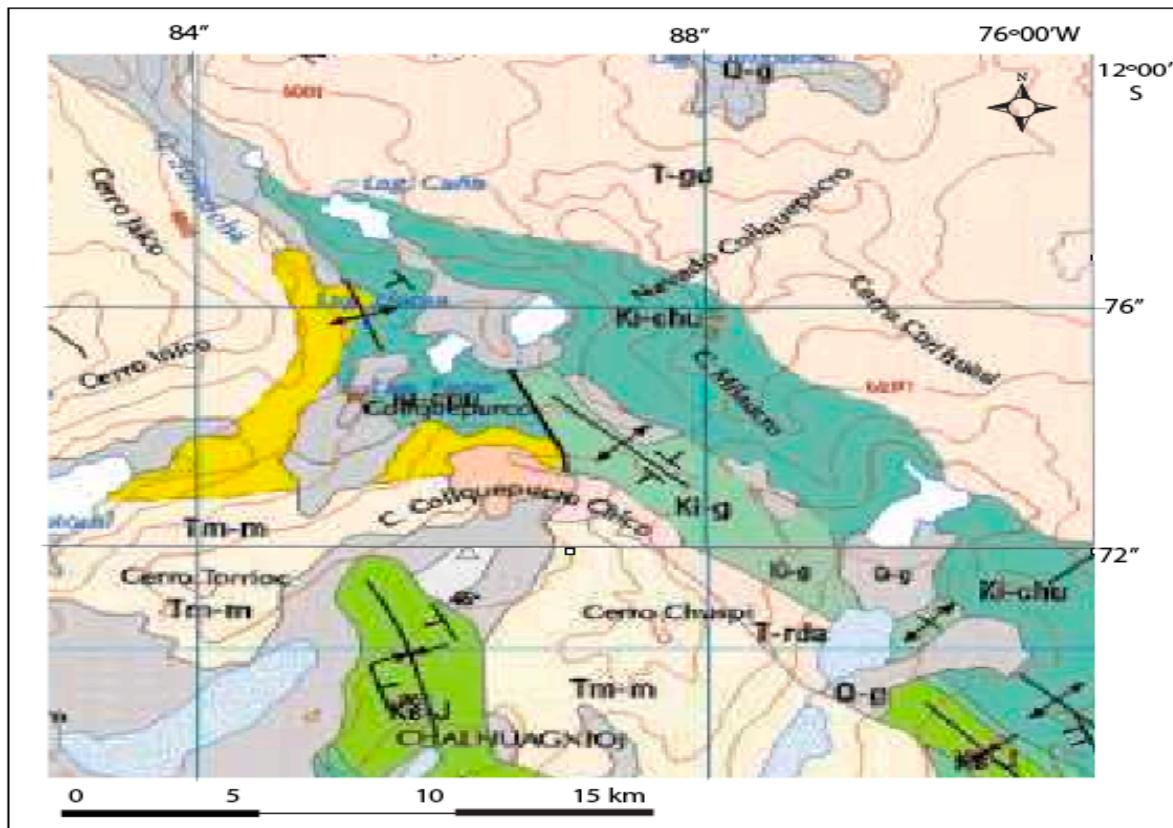


Figura 5: Reducción del mapa geológico al área de estudio, en color verde la Cordillera Pariaqaqa (escala 1:50.000) del Instituto Geológico y Metalúrgico del Perú, hojas 25K-Huarochiri y 25L-Yauyos (INGEMET).

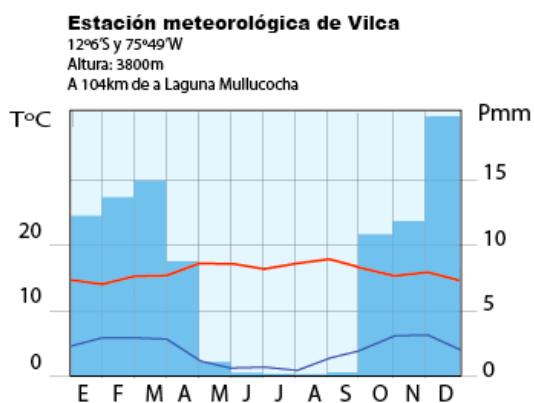
1.4 Clima

Existen diversos agentes que influencian el clima en la región de estudio, e la vertiente del Pacífico de los Andes Centrales, entre ellos los dos más importantes son la corriente marina fría de Humboldt y el régimen anual de circulación atmosférica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), estos dos factores son modificados periódicamente por el fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) (Ùbeda, 2011) y la altitud. La región se caracteriza por un clima de alta montaña, condicionado en gran parte, también, por el factor altitudinal con bajos niveles de presión atmosférica (40% menos que a nivel del mar) y por su orientación (figura 8).

La influencia de los aportes de agua fría por la **corriente de Humboldt** se refleja en la temperatura y la aridez en estas latitudes. Es por este motivo que la temperatura anual de Lima (20°C) es menor a la de Bahía (26°C), en la costa atlántica de Brasil (worldweather.com). Ocurre que al enfriarse la troposfera se genera una inversión térmica en un intervalo reducido de altitud que bloquea los procesos de condensación y precipitación y, de este modo, impide que la costa, influenciada por esta corriente, reciba los aportes de lluvias procedentes del océano.

La precipitación en la cordillera Pariaqqa procede de la Amazonía y su estacionalidad, característica, se debe a la evolución anual de la **ZCIT** (figura 7). De diciembre a marzo, el Hemisferio Norte se enfriá y desplaza hacia el sur a la corriente atmosférica, generando aportes de precipitación (la mayor que se recibe en el año) en la cuenca Amazónica. De mayo a octubre, el Hemisferio Norte se calienta y la corriente recupera su circulación zonal sobre el Ecuador, por este motivo se produce la estación seca, coincidente con el invierno austral.

Ambos agentes, la corriente de Humboldt y la corriente atmosférica ZCIT, pueden modificarse por el fenómeno ENSO en un período de recurrencia de entre tres y ocho años y, en aproximadamente, un año de duración (Burroughs, 2003). El fenómeno ENSO puede afectar el proceso de acumulación de nieve en los glaciares de las cordilleras al estar relacionado con sequías excepcionalmente intensas (Aceituno, 1998; Francou y Pizarro, 1985; Francou y Sémiond, 1997; Thompson et al., 1984).



Así, la estacionalidad anual no significa un gran cambio de temperatura anual sino de humedad, mientras que los cambios de temperatura se ven contrastados en la media diurna, pasando de noches muy frías a tardes más o menos cálidas (figura 6).

Figura 6: Climograma de la estación meteorológica de Vilca, a 104km al sur de los glaciares, a 3.800 m de altitud. La temperatura media diaria es de 17°C a las 19h (línea roja) y de 2°C a las 09h (línea azul). Las lluvias se distribuyen en dos estaciones anuales: estación húmeda (de octubre a abril) y estación seca (de junio a septiembre). Fuente:SENAMHI.

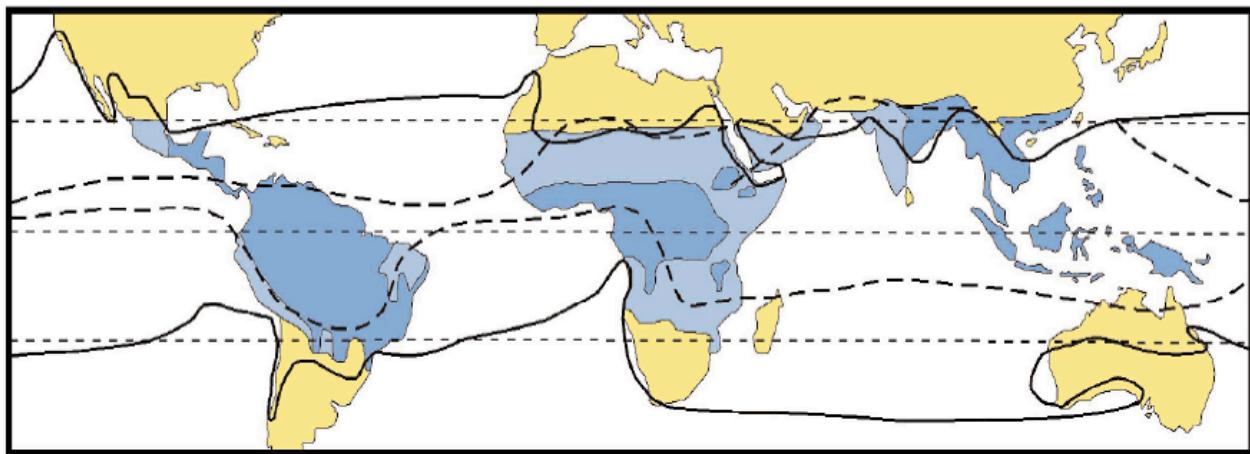


Figura 7: las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical favorecen la existencia de una estación húmeda durante el verano austral (noviembre a abril) y una seca durante el invierno (mayo a octubre) (Kaser, G. y Osmaston, H. A., 2002)

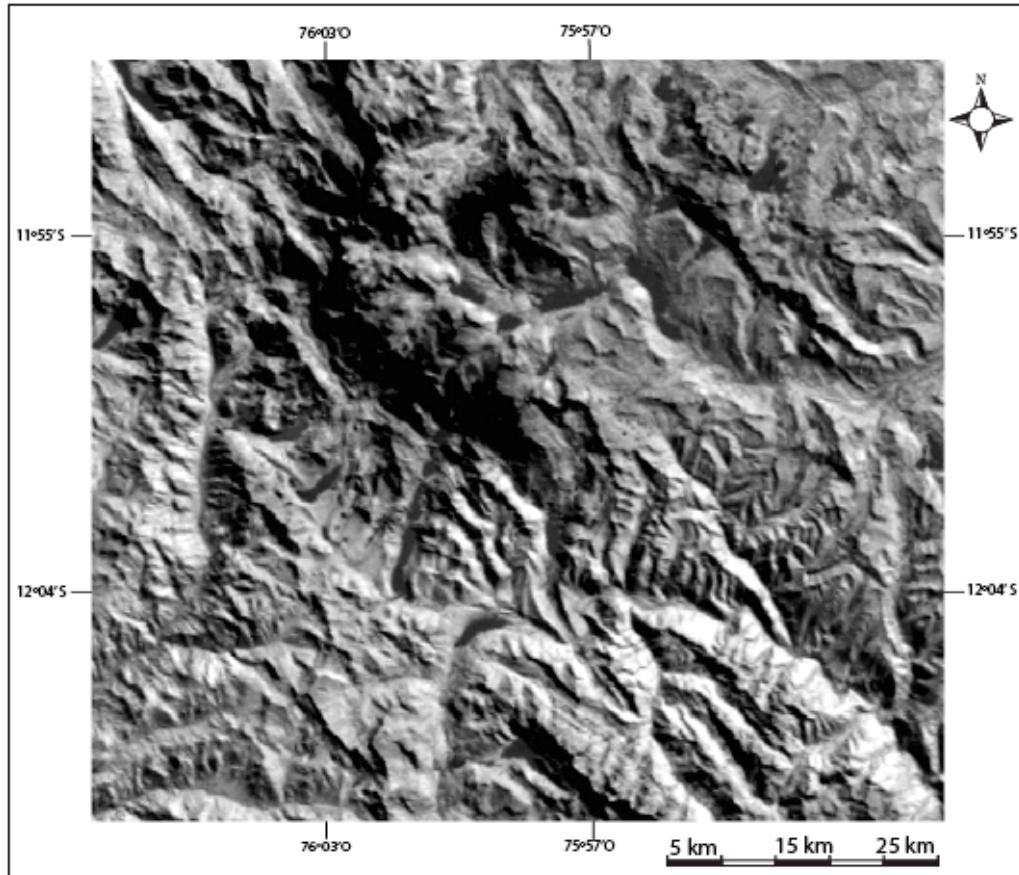


Figura 8: Imagen Landsat de 1997 en la que se reflejan la orientación oeste de la Cordillera.

1.5 Evolución de los glaciares en los Andes Centrales y sus implicancias climáticas

Los glaciares tropicales son extremadamente sensibles a los cambios del clima (Kaser y Osmaston 2002). Las fases glaciares en los Andes Centrales tuvieron una estrecha relación con la actividad tectónica y con factores orbitales.

En cuanto a su relación con la actividad tectónica, hacia finales del Plioceno, la Cordillera Andina alcanzó una altitud suficiente para permitir la presencia de masas de hielo (Hastenrath, 1967 a y 1967 b). A partir de entonces, los glaciares se expandieron y cubrieron extensas superficies hasta por encima de los 3.000 m de altitud, esta etapa se puede ver reflejada en la geomorfología glaciar de la región, incluyendo circos, aristas, valles en forma de “u” y una amplia variedad de morrenas (Alcalá et al., 2007; Clapperton, 1983; Hastenrath, 1985 a; Hastenrath, 1985 b; Úbeda, 2011).

La teoría de Milancovich (1941) explica las fluctuaciones entre períodos cálidos y fríos a partir de tres factores de la órbita terrestre en torno al Sol. Al combinarse estos tres ciclos, se forma una fluctuación climática en la Tierra entre períodos cálidos y fríos.

- 1) la excentricidad terrestre varía cada 100.000 años (100 ka).
- 2) la inclinación del eje terrestre varía cada 41 ka.
- 3) la precesión varía de 19 a 23 ka.

La variación de la extensión glaciar en los Andes Centrales se debe, en su contexto más amplio, a la influencia de estos dos fenómenos, el tectónico y orbital, en un período de tiempo de millones de años. (Klein and Isacks, 1998) estimaron que durante el último máximo glacial (Last Glacial Maximum o LGM) hubo aproximadamente 11.000 glaciares ocupando una superficie de ~29.800 km² y tenían un volumen total de ~3.700 km³.

El interés del presente trabajo es realizar un análisis del estado de los glaciares en 2010 teniendo como punto de partida la Pequeña Edad del Hielo (PEH). La PEH (en inglés Little Ice Age, LIA) tuvo lugar entre el siglo XIV y el finales del siglo XIX y se denomina así por ser la última etapa en que se produjo una continua progresión de superficies glaciares a nivel mundial. Estos avances fueron bien documentados en glaciares de climas polares y subpolares y aunque las masas de hielo tropicales ocuparon una superficie menor que en las latitudes medias (Rabatel et al., 2008) consideraron que los avances glaciares durante la PEH alcanzaron la misma magnitud en glaciares de climas polares, subpolares y tropicales.

El método de datación más frecuente para determinar la cronología de la PEH se ha basado en tasas de crecimiento de especies liquénicas primicolonizadoras en morrenas depositadas por las masas de hielo al culminar sus avances. El método asume que una vez conocido el ritmo de crecimiento de los líquenes se puede estimar una fecha aproximada para el depósito de las morrenas. Se han realizado dataciones de este tipo en dos sectores de los Andes Centrales: en la Cordillera Blanca (9-10°S, 77°O; (Solomina et al., 2007) y la Cordillera Real de Bolivia (15-16°-67-68°O; (Rabatel et al., 2008), ambos basados en la especie liquénica *Rhizocarpon*.

La cronología de los avances glaciares durante la PEH obtenida por el método liquénico antes descrito, ha permitido comparar las fechas con otros indicadores para conocer el contexto paleoambiental de las fases glaciales (Úbeda, 2011). Los indicadores con los que fue comparado son los siguientes:

- a) Tasas de acumulación de nieve registradas en la estratigrafía de testigos de hielo (*ice cores*) procedentes de dos montañas de Perú, el Nevado Huascarán (9°S, 77°O), en la Cordillera Blanca (Thompson et al., 1995) y el Nevado Quelccaya (14°S, 71°O), en la cordillera oriental (Thompson et al., 1986) (figura 9).
- b) Estudios de pólenes contenidos en un testigo de hielo del Nevado Sajama (18°S, 69°O), en Bolivia (Liu et al., 2005) y testigos de sedimentos de la laguna Marcacocha (13°S, 72°O) en Cusco (Perú), investigados por (Chepstow-Lusty et al., 2003).

(Thompson et al., 2000) calcularon la tasa $\delta^{18}\text{O}$ de los testigos de hielo de los nevados Huascarán y Quelccaya y observaron que mostraba valores especialmente negativos entre 1500 y 1890. Puso de manifiesto un marcado enfriamiento que interpretaron como el periodo de la Pequeña Edad del Hielo en los Andes Centrales.

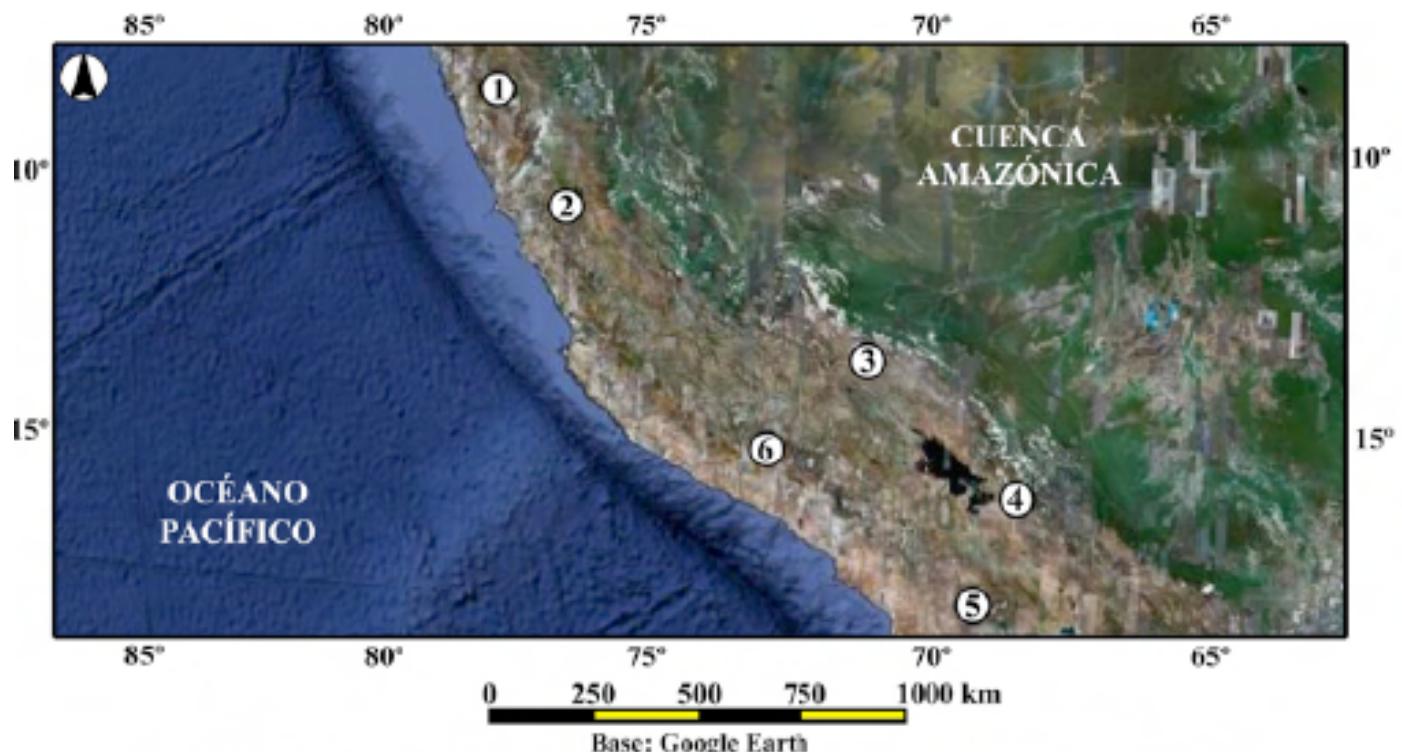


Figura 9: Localización de los lugares indicados en el texto en relación con la PEH: Nevado Huascarán (1). Laguna Marcacocha (2). Nevado Quelccaya (3). Cordillera Real (4). Nevado Sajama (5) y Nevado Coropuna (6). Fuente: (Úbeda, 2011).

2. METODOLOGIA

La delimitación de los glaciares y paleoglaciares se ha realizado a partir de la geomorfología interpretada en imágenes satelitales 2010 de Google earth. La calidad de estas imágenes y la posibilidad de alternarlas a diversas escalas hizo posible una correcta delimitación y visualización de los depósitos glaciares. Posteriormente, la información será tratada en el entorno de ArcMap 10 y finalmente en una hoja programada Excel.

Materiales

Institución	Material	Fecha
Google Earth	Imágenes satelitales	2010
USGS Earth Explorer	Landsat 5 TM	1997
GEM	Modelo Digital del Terreno y Hoja Excel programada para el cálculo de ELA AABR	

2.1 Delimitación de glaciares actuales (2010) y de morrenas

Dada la posibilidad de trabajar con escalas muy reducidas (1:100) en el entorno de Google earth (figura 10), la delimitación de glaciares y de morrenas fue realizada directamente en este programa con las herramientas de **Polígonos** para delimitar glaciares y **Líneas** para morrenas.



Figura 10: vista en detalle, escala 1:100, de un glaciar actual delimitado en Google earth.

El resultado de la delimitación de glaciares fueron 23 polígonos en formato kmz que se transformaron al formato .shp para ser compatibles con el entorno de trabajo de ArcMap empleando el programa de intercambio de archivos Global Mapper. Los glaciares 2010 se denominaron utilizando números del 1 al 23 comenzando por nombrar 1 al glaciar en el extremo NO hasta finalizar con el glaciar 23 en el extremo SE.

Los cuerpos cuyo contenido se haya interpretado como nieve, únicamente, no fueron considerados como glaciares ni incluidos en el trabajo.

La delimitación de morrenas servirá para la reconstrucción de la superficie de los paleoglaciares de la PEH (punto 2.2) y el criterio para para delimitarlas fue incluir aquellas superficies que por su morfología y distancia a los glaciares actuales, pudieran ser interpretadas como huellas de la PEH (figura 11).



Figura 11: delimitación de morrenas de la PEH.

Así, en el programa de Google earth se crearán dos archivos kmz, uno de polígonos (glaciares) y otro de líneas (morrenas) y ambos serán transformados con el conversor de Global Mapper a un formato shp para ser digitalizado en el entorno de trabajo de ArcMap, en donde se calcularán sus áreas y los pasos siguientes.

2.2 Reconstrucción de paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo (PEH)

Las morrenas son el mejor indicador de las fluctuaciones glaciares en diversos períodos climáticos. La cartografía de los paleoglaciares PEH se hizo sobre un mosaico elaborado a partir de imágenes de Google earth de modo que la imagen cubriera la totalidad del área estudiada con un buen nivel de detalle.

El Mosaico fue elaborado con el programa Photoshop y almacenado como un archivo .tiff que luego fue Georreferenciado en ArcMap en base a una imagen Landsat conseguida de la base de datos de la U.S. Geology Service. El proceso de **Georreferenciación** implicó un registro de puntos de control sobre el terreno (GCP), de imagen a imagen, reconocibles tanto en el Mosaico como en la imagen Landsat para, con ello, otorgarle al Mosaico las coordenadas de terreno de la imagen Landsat. Los GCP fueron localizados, principalmente sobre lagunas glaciares, rocas y límites glaciares y el margen de error (RMS) fue de 14,4 m (figura 12).

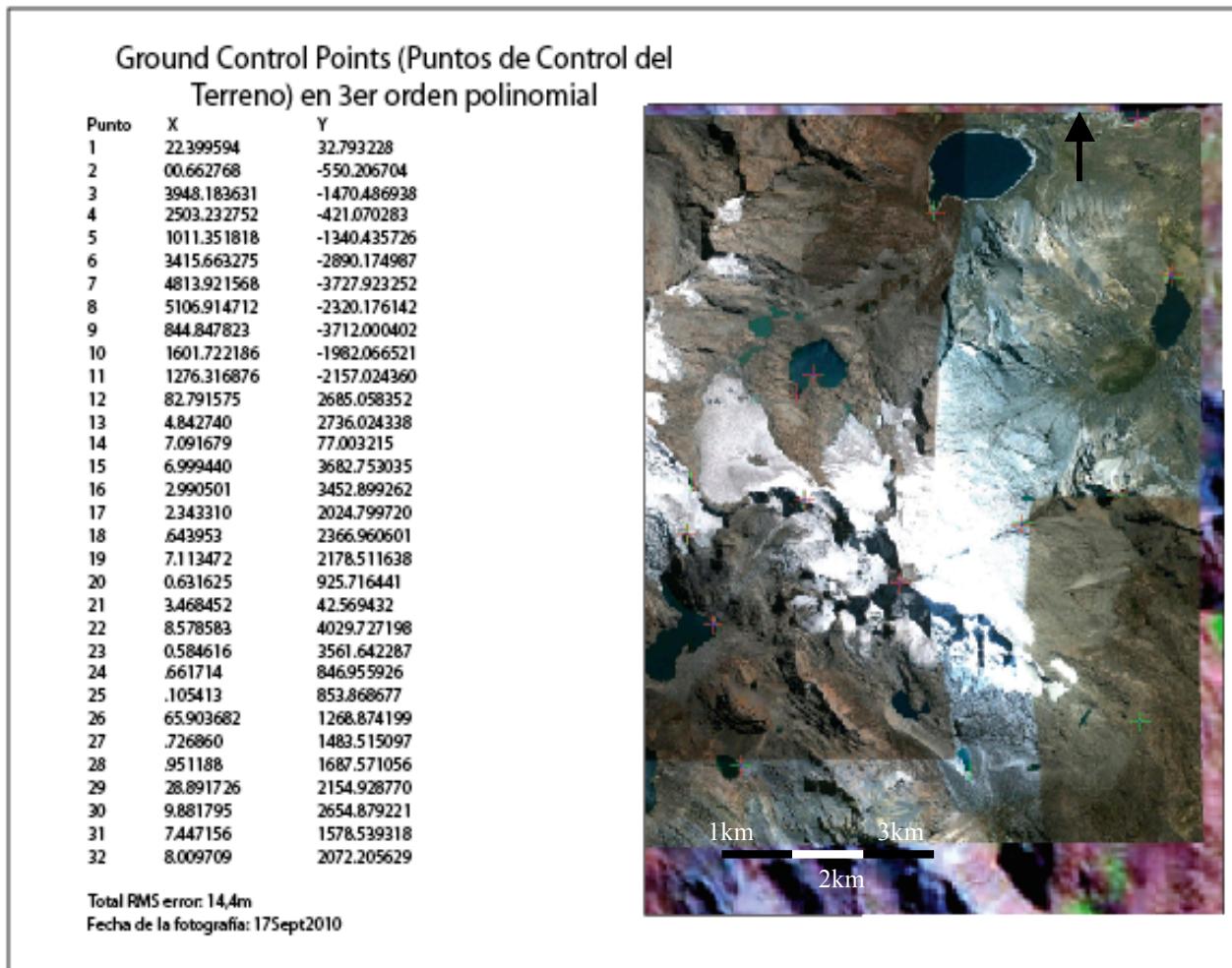


Figura 12: puntos de control establecidos para la rectificación del mosaico sobre una imagen Landsat 5-0070681997171AAA03 en el entorno de ArcMap.

La disponibilidad del Mosaico por su alta resolución permitió la reconstrucción de los paleoglaciares al poderse trabajar sobre él las delimitaciones de morrenas y glaciares

previamente elaboradas, además de reflejar otros valores geomorfológicos como la línea de cumbres, rocas aborregadas, formas de valles y, sobre todo, la dirección y el sentido preferente de los flujos de las antiguas superficies glaciares (paleoglaciares).

Por tanto, los paleoglaciares son masas de hielo extintas que pueden ser deducidas por sus huellas geomorfológicas habiendo confluido hacia una misma vertiente (figura 13). Fue la confluencia hacia una misma vertiente o pared de montaña el criterio utilizado para reconstruir los paleoglaciares y para otorgarles una denominación.

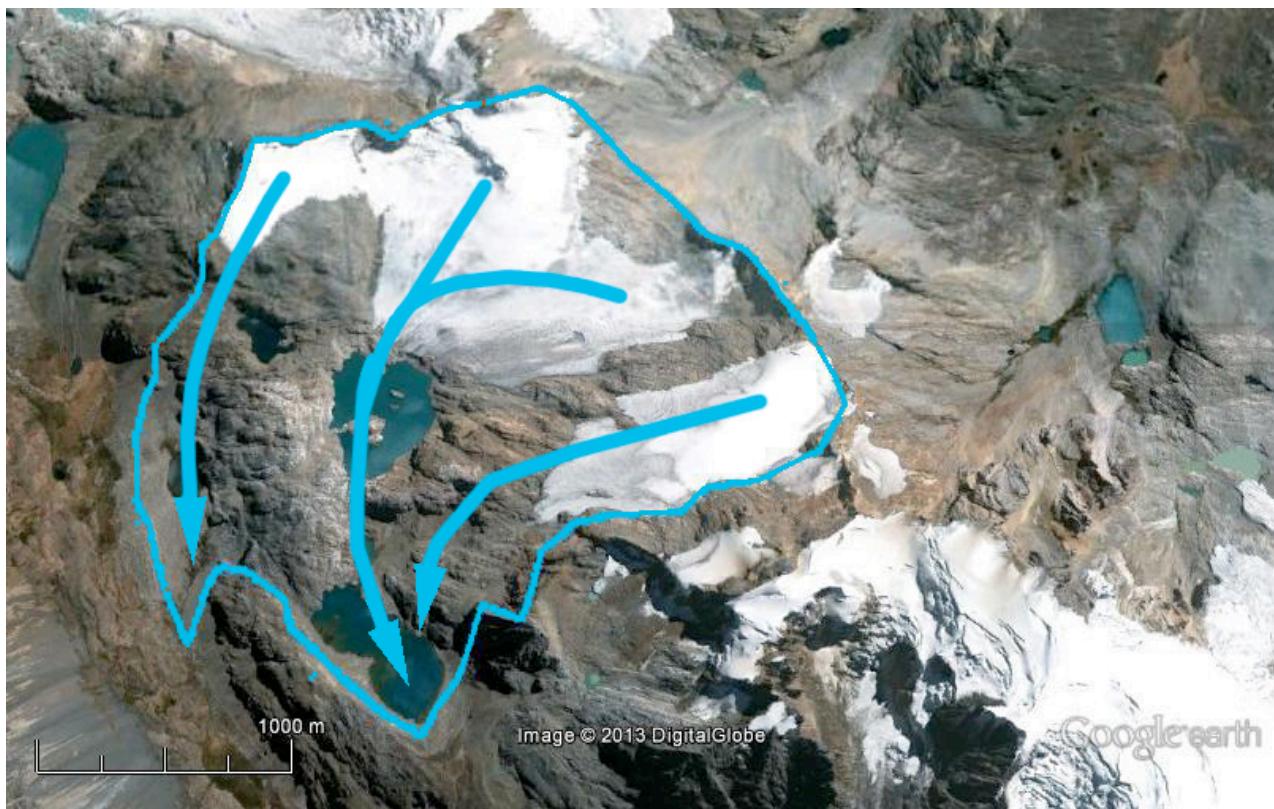


Figura 13: vista en detalle (escala 1:1000) de uno de los paleoglaciares de la PEH delimitado en Google earth. Se indican las direcciones y sentidos de los antiguos flujos deducidos para reconstruir la extensión de las masas de hielo.

2.3 Cálculo de las superficies y ELAs AABR 2010 y PEH

Una vez digitalizados los glaciares y paleoglaciares en el entorno de ArcMap, se hizo un **cálculo de la superficie** de forma individual para cada polígono, con la herramienta “*Calculate Area (m²)*” de la Caja de Herramientas (*ArcToolBox*) o bien la herramienta “*Calculate Geometry (m²)*” desde la misma Tabla de Atributos de cada glaciar.

Para las estimaciones de las ELAs y paleoELAs, Úbeda (2011) diferenció métodos morfométricos y métodos estadísticos para reconstruir los valores de las ELAs de glaciares actuales y paleoglaciares. En esta metodología, se empleó el método estadístico de *Area x Altitude Balance Ratio* (AABR) propuesto por Osmaston (2005) dado que ofrece mejores resultados y es aplicable tanto para glaciares actuales como para paleoglaciarios (Benn et al., 2005; Osmaston, 2005; Úbeda, 2011).

Reconstrucción de las ELAs (para glaciares 2010 y paleoglaciares):

El primer paso es dividir el polígono glaciar o paleoglaciario en bandas altitudinales, para ello y dentro del entorno de ArcMap, se activa la opción de Editar (Edit: start editing), se seleccionan todas las curvas de nivel (desde su Tabla de Atributos) y se elige la opción de la barra de herramientas “*Topology: Split Polygons*”, en *Split Polygons* se ingresa la capa que se quiere dividir. Estos pasos van a dividir el polígonos en tantos intervalos altitudinales como curvas de nivel atraviesen el área (figura 14). Es así que cada glaciar o paleoglaciario se queda dividido en un número determinado de bandas altitudinales y cada banda tiene un valor máximo y mínimo de altura referido a la curva de nivel.

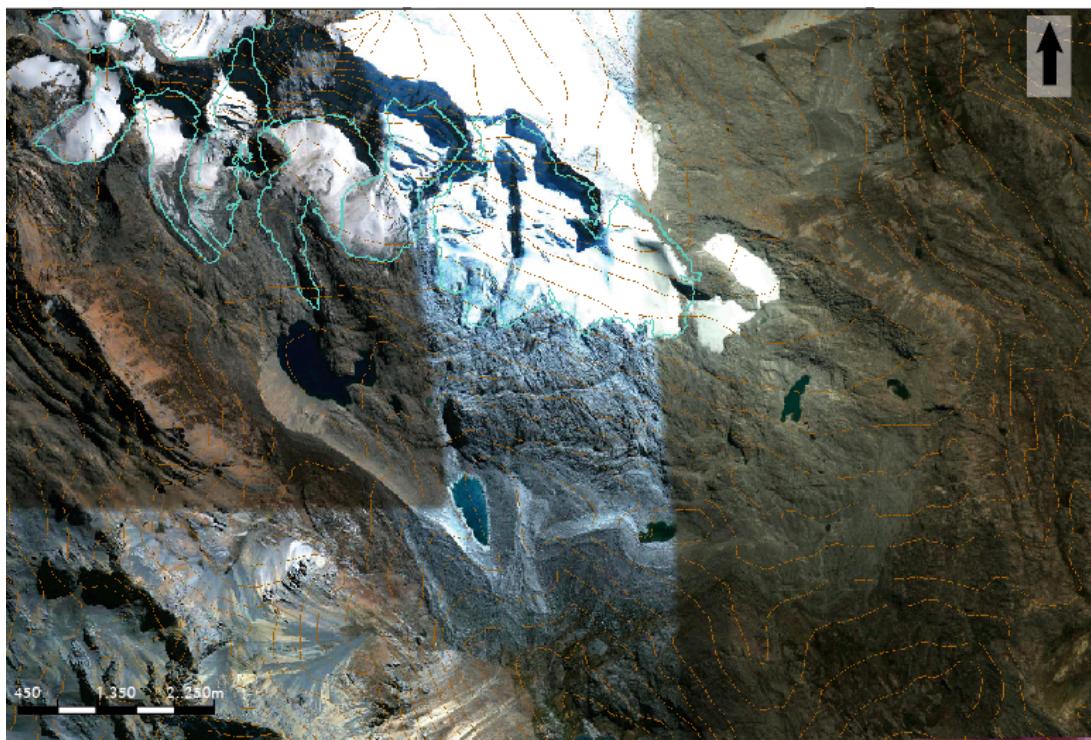


Figura 14: polígonos (shp) cortados por las bandas altitudinales.

Una vez cortados todos los polígonos en bandas, se exporta la información de cada capa a un formato de base de datos (bdf) para trabajar con una hoja Excel. Aquí, se van a deducir los valores altitudinales para cada banda de las altitudes de las curvas de nivel, que pueden ser consultadas con la herramienta de información (*i*) de ArcMap. Estos datos se ingresaron de forma manual en una columna de altitudes mínimas y máximas para cada intervalo que luego se sintetizó en una “Altitud Media” para cada intervalo.

Tabla 1: Atributos del Polígono exportado a un archivo .dbf compatible con Excel:

Glaciar 1 (2010)				
Name	Area (m2)	Z Mínima	Z Máxima	Z Media
Glaciar 1	1935,64	4500	4700	4675
Glaciar 1	4062,765	4700	4750	4725
Glaciar 1	2074,3	4750	4800	4775
Glaciar 1	1094,94	4800	4850	4825
Glaciar 1	2843,44	4850	4874	4862
...				

La información reflejada en la Tabla 2 es suficiente para tabularla en el libro Excel programado por Henri Osmaston (2005). El cálculo fue realizado de forma automática debiendo, sin embargo, redirigir y supervisar algunos resultados. El libro excel consta de dos partes:

- **Hoja de cálculo A1 (figura 15):** en donde se estiman las ELAs individuales para cada glaciar utilizando la ecuación de Sissons (Sissons, 1974; Sissons, 1980): $ELA = \frac{\sum(Z \cdot S)}{S}$
Donde $\sum(Z \cdot S)$ = al sumatorio del producto de la altitud media de cada intervalo altitudinal (m) por su área (m^2) y S = la superficie total del glaciar (m^2).

La hoja pondera los cálculos con diferentes valores de Balance Ratio (BR), un parámetro que expresa la relación entre los gradientes de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar. Los valores BR utilizados en esta metodología fueron los mismos que los empleados por Osmaston (2005), Úbeda (2011), Giráldez (2011), Campos (2012) y García Gutiérrez (2013): BR= 1; 1,5; 2; 2,5 y 3. (punto (6) en la figura 15).

Previamente, para usar la hoja de cálculo 1, se introdujeron los límites altitudinales superiores e inferiores las columnas C y D ((1) en la figura 15) para cada intervalo, en metros. La columna E (Z media) calculó automáticamente la altitud media entre C y D.

En la columna F se introdujo el área para cada intervalo (m^2) y la columna G (3) multiplicó automáticamente la altitud media x el área: *AreaxAltitude*. Una vez hecho esto, se calcula el valor de la ELA con BR=1 en color amarillo ((4) en la figura 15).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ELAS AABR 2010

Poner a prueba sucesivos valores de BR y grabarlos abajo* **curva de nivel inferior a la ELAAA y más próxima a ella

GLACIAR 2	(1)	(1)	(1)	(2)	(3)	Balance Ratio (BR)*	ELA trial Reference contour(1)**	Belt Area x Alt above ref. contour 1	ELA trial Reference	Belt area x Alt above ref. contour(2)	Area x Alt x Balance Ratio for contour(2)
	Z Minima	Z Máxima	Z media	Area (m2)	Z media x Area (m2)			Area x Alt x Balance Ratio for contour(1)	Area x Alt x Balance Ratio for contour(2)	Area x Alt x Balance Ratio for contour(2)	
1	4980	5000	4990	103169.300	514814806.3	3.0	5050	-6190158	-18570474	10030	-519973271
2	5150	5170	5160	152.56	787189.4			16781	16781		-742948
3	5000	5050	5025	214563.79	1078183038.2			-5364095	-16092284		-1073891762
4	5130	5150	5140	243.10	1249508.9			21879	21879		-1188735
5	5150	5200	5175	14734.94	76233313.8			1841867	1841867		-71538133
6	5200	5250	5225	5091.86	26604958.4			891075	891075		-24463378
7	5050	5100	5075	234285.26	1188997678.0			5857131	5857131		-1160883447
8	5100	5150	5125	224285.27	1194462015.1			16821395	16821395		-1100119255
9	5230	5250	5240	19.77	103600.1			3756	3756		-94703
10	5150	5200	5175	101054.84	522958812.3			12631855	12631855		-490621263
11	5250	5270	5260	252.04	1325705.6			52927	52927		-1202208
12	5200	5250	5225	86883.27	4539650813			15204572	15204572		-117174108
13	5250	5300	5275	62243.01	328331886.8			14004678	14004678	4980	-295655521
14	5350	5370	5360	6.67	35759.6			2068	2068		-31156
15	5330	5350	5340	34.71	185335.2			10065	10065		-93469
16	5290	5300	5295	46.10	244115.8			11295	11295		-218298
17	5500	5530	5515	601.46	3317041.1			279678	279678		-654894
18	5300	5350	5325	57510.20	306241800.4			15815304	15815304		-8146749
19	5450	5500	5475	7070.28	38709760.0			3004867	3004867		-270585478
20	5440	5450	5445	17.22	93767.0			6802	6802		-811756434
21	5350	5400	5375	47155.74	253462082.4			15325614	15325614		-32205106
22	5400	5412	5406	45.90	248134.1			16340	16340		-96615319
23	5400	5425	5413	902.50	4884770.7			327156	327156		-236871
24	5500	5520	5510	216.04	1190399.2			99380	99380		-4167285
25	5450	5500	5475	2210.75	12103833.7			939567	939567	4980	-12501854
26	5400	5450	5425	31209.11	169309425.2			11703416	11703416		-10059948
				TOTALS	984736.0			41788988	41788988		-30209843
					5014705707.5						-4862196213
											-1458658839

RESULTS

AA ELA(median alt x area, shortcut method) = (4) 5092 CHECK = (5) TRUE

AABR ELA for BR=0 (if exact contour) =

AABR ELA for BR=1 (interpolated between contours) =

5092

AABR ELA for other BRs (if exact contour) =

(7) 5056

AABR ELA for other BRs (interpolated between contours) =

BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3,0
5092	5074	5065	5059	5056

(8)

Figura 15: hoja de cálculo A1 con los datos programados para el cálculo de la ELA 2010 del Glaciar 2. Como se puede ver reflejado en la columna B, el Glaciar 2 tiene 26 bandas altitudinales.

En la columna I (4) (ELA trial Reference contour 1) se ingresó la altitud, múltiplo de 50, inmediatamente inferior al valor obtenido para la ELA BR=1. Este paso es un apoyo que verifica que el procedimiento se esté siguiendo en orden y los valores sean congruentes, así, al ingresar este valor, en la celda I (5) aparece de forma automática la palabra *True* o *False*, siendo *True* la verificación de que el procedimiento es correcto.

Finalmente, se ponderó el valor de esta ELA con el resto de valores BR (1,5; 2; 2,5 y 3) y para cada ponderación, se obtuvo un valor diferente de ELA media, el cual fue anotado en los resultados finales de las columnas D, E, F, G, H ((8)). Estas columnas fueron enviados automáticamente a la **Hoja de cálculo A2**.

- **Hoja de cálculo A2:** los resultados de las ELAs BR de la Hoja de cálculo A1 se tabularon automáticamente en la hoja A2 (figura 17). Como se refleja en la imagen, cada glaciar tiene 4 ELAs que varían según el BR. En la última fila (promedio y desviación típica) la hoja estimó los promedios y las desviaciones típicas de cada serie “BR”. La ELA promedio vinculada con una desviación típica más reducida fue elegida como resultado final y resaltada en color amarillo, por considerar que era la estimación más probable de la ELA o paleoELA representativa del área de estudio (Osmaston, 2005).

ELAs CORNE 2010					
	BR=1	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
Glaciar 1	5229	5216	5210	5206	5203
Glaciar 2	5092	5074	5065	5059	5056
Glaciar 3	5177	5152	5138	5131	5125
Glaciar 4	5327	5314	5307	5303	5300
Glaciar 5	5101	5106	5110	5112	5114
Glaciar 6	5101	5106	5110	5112	5114
Glaciar 7	5127	5117	5111	5108	5106
Glaciar 8	4885	4868	4860	4854	4851
Glaciar 9	5305	5314	5323	5329	5333
Glaciar 10	4806	4803	4807	4810	4812
Glaciar 11	5337	5323	5316	5312	5309
Glaciar 12	5405	5402	5406	5408	5410
Glaciar 13	5094	5079	5072	5067	5064
Glaciar 14	5144	5129	5122	5117	5114
Glaciar 15	5167	5159	5155	5152	5150
Glaciar 16	5060	5050	5055	5059	5061
Glaciar 17	5161	5152	5151	5153	5155
Glaciar 18	5134	5119	5111	5107	5104
Glaciar 19	5123	5112	5107	5104	5102
Glaciar 20	5104	5100	5102	5103	5104
Glaciar 21	5044	5028	5020	5016	5013
Glaciar 22	5111	5105	5102	5100	5100
Glaciar 23	5147	5128	5118	5112	5108
promedio	5138	5129	5125	5123	5122
Desviación típica	132	133	134	134	134

Figura 17: hoja de cálculo 2 para el cálculo de la ELA 2010 del área de estudio, con indicación en color amarillo del resultado seleccionado por estar vinculado con el promedio con la menor desviación típica.

La ELA media más probable para el glaciar o conjunto de glaciares será aquella que cuente con la menor **Desviación Típica** (Osmaston, 2005).

La reacción de la ELA a las condiciones de cambio climático dependen del balance de masa vertical a una altitud específica. (Kaser, G, y Osmaston, H. 2002) y por ello, representan un buen indicador para la evolución de los glaciares ante el cambio climático.

2.4 Tasas de deglaciación para la elaboración de pronósticos sobre la evolución de los glaciares

La elaboración de posibles escenarios de futuro de los glaciares es un aspecto de interés dada la importancia que tienen como recurso hidrológico en la costa peruana y como amortiguador de períodos de lluvias fuertes.

Para realizar los pronósticos se utilizaron tasas de deglaciación propuestos por (Giraldez, 2011; Úbeda, 2011) basadas en las tendencias de las superficies glaciares y ELAs, que permiten estimar el año de la posible desaparición de la masa de hielo respectiva. En este sentido, es necesario señalar que en el caso de las previsiones basadas en las tendencias de las superficies los resultados se referirían al momento en que ocurriría una desaparición completa del cuerpo glaciar. Mientras que en el caso de las tendencias de las ELAs, se refieren al momento en que la ELA se elevaría sobre el límite superior del glaciar, lo que significa que la zona de acumulación desaparece y, por tanto, la masa desaparecería en cuanto los agentes climáticos fuden la masa de hielo restante.

El procedimiento consiste en determinar, en primer lugar, las tasas de deglaciación, para aplicarlas a continuación en la elaboración de las previsiones. Los métodos consisten en resolver las siguientes ecuaciones:

2.4.1. Para estimar las tasas de deglaciación:

$$Td_s = \sum S / R$$

$$Td_{ELA} = \sum ELA / R$$

Siendo:

Td_s : tasa de deglaciación basada en la reducción de la superficie ($km^2/año$).

Td_{ELA} : tasa de deglaciación basada en el incremento de la ELA ($m/año$).

ΔS : reducción de la superficie ($km^2/año$)

ΔELA : incremento de la ELA (m)

R : rango (número de años de la serie)

2.4.1. Para estimar las fechas de desaparición de los glaciares:

$$H_0 = (S_{2010}/Td_s) + 2010$$

$$H_0 = (D_{2010}/Td_{ELA}) + 2010$$

Siendo:

H_0 : fecha de desaparición de los glaciares

S_{2010} : superficie del glaciar en 2010 (km^2).

Td_s : tasa de deglaciación basada en la reducción de la superficie entre la PEH y 2010 ($km^2/año$).

D_{2010} : desnivel entre el valor de la ELA en 2010 y la cota máxima del glaciar (m).

Td_{ELA} : tasa de deglaciación basada en el incremento de la ELA ($m/año$).

2.5 Cálculo del calentamiento desde la PEH

La estimación de la ELA media 2010 y PEH permitió deducir el desnivel altitudinal entre ambos períodos. A partir de esa diferencia, se puede calcular el enfriamiento durante la PEH con respecto a 2010 y se estimó resolviendo la siguiente ecuación (Úbeda, 2011):

$$\downarrow T = GTV \cdot \downarrow ELA$$

Siendo:

$\downarrow T$: enfriamiento del clima durante la PEH (°C).

GTV: Gradiente Térmico Vertical (°C/m)

$\downarrow ELA$: depresión de la paleoELA en la PEH con respecto a 2010

Para un estudio equivalente en el Nevado Coropuna (Úbeda, 2011) empleó un GTV de 0,0084 °C/m, deducido por sensores instalados en diferentes altitudes de la montaña. Sin embargo, Pariaqaqa carece de este tipo de registros y, por otra parte, la región del Coropuna tiene niveles de aridez más altos. Es así que en este trabajo se aplicó el valor medio del GTV para la Tierra (0,0065°C/m), como lo hizo (Giraldez, 2011) en la Cordillera Blanca

3. RESULTADOS

El objetivo de este trabajo era calcular el área de los glaciares actuales y paleoglaciares y el valor, en metros, de sus respectivas ELAs. Para ello, en primer lugar, se delimitaron los glaciares, las morrenas, se reconstruyó la superficie glaciar y paleoglaciada para obtener datos de sus áreas y ELAs y con ello elaborar escenarios de futuro para la evolución de estos glaciares.

3.1. Delimitación de glaciares de 2010, morrenas y paleoglaciares de la PEH

En la figura 18 se muestra la delimitación de los glaciares en 2010 (en un archivo kmz de polígonos, compatible con shp) y las morrenas atribuidas a la PEH (en una capa de líneas, igualmente compatible) por su tamaño y por situarse próximas a la superficie de los glaciares actuales. Las imágenes datan del 08 de agosto de 2010 (periodo anual de ablación).

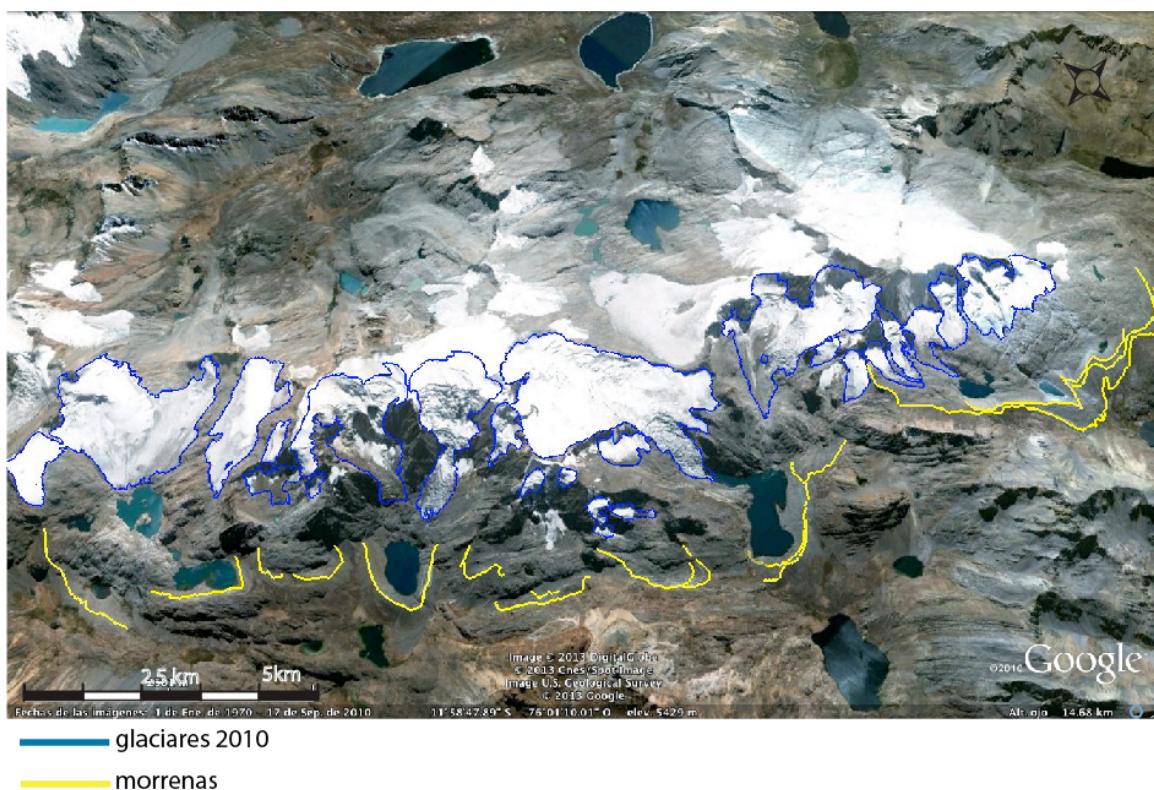


Figura 18: delimitación de los glaciares en 2010 y las morrenas de la PEH en Google Earth.

La delimitación de morrenas permitió reconstruir los paleoglaciares de la PEH reflejados en la figura 19 junto con los glaciares de 2010, para contrastar de forma visual el retroceso de las masas de hielo entre las dos fases. La reconstrucción de los paleoglaciares se hizo en el entorno de ArcMap10 y de allí se obtuvieron los valores de la superficie para cada período.

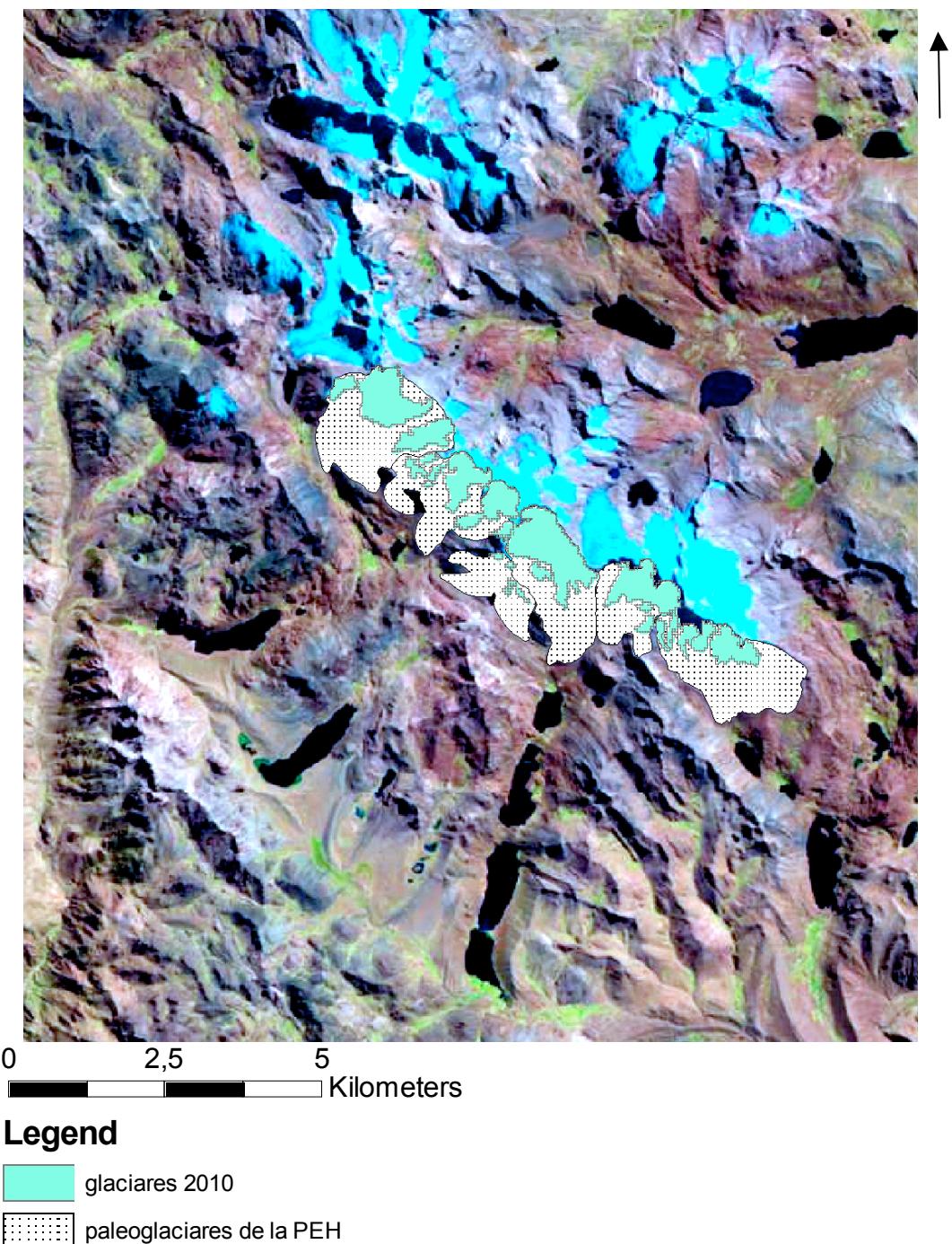


Figura 19: delimitación de los glaciares de 2010 y PEH. Elaboración propia, ArcMap e imagen Landsat 1997.

3.2. Superficie de los glaciares en 2010 y en la PEH

Los resultados de la medida de superficies se recogen en las tablas de la figura 20, para 2010 (glaciares 1 al 23) y figura 21, para la Pequeña Edad del Hielo (paleoglaciares Pariaqaqa S, Pariaqaqa N, Chollquepucro S, Chollquepucro O, Chollquepucro S, Chollquepucro N y Cana). En la primera columna de la figura 20 se indica la Quebrada a la que pertenece cada glaciar, en la segunda columna, la denominación del glaciar (1 a 23) y en la tercera, el área de cada uno. Una Quebrada es una hendidura o un paso en una montaña, se identificaron 6 Quebradas en la Cordillera que agruparon a un número determinado de glaciares. De esta forma, los glaciares pueden identificarse de forma individual (1 al 23) o grupal (Quebradas).

La superficie total en 2010 ($3,13 \text{ km}^2$) representa un 15% de la extensión que tenían las masas de hielo en la PEH ($21,27 \text{ km}^2$), mostrando una fuerte reducción desde su último avance.

QUEBRADA:	GLACIAR:	ÁREA (km^2)
Pariaqaqa S	23	0.09
	22	0.06
	21	0.06
	20	0.06
	19	0.26
Pariaqaqa N	18	0.40
	17	0.04
	16	0.08
Chollquepucro S	15	0.02
	14	0.08
Chollquepucro W	13	0.05
	12	0.02
	11	0.02
	10	0.02
Chollquepucro N	9	0.02
	8	0.14
	7	0.02
Cana	6	0.17
	5	0.98
	4	0.32
	3	0.06
	2	0.07
	1	0.07
Total (km^2)		3.13

Figura 20: resultados de la medida de la superficie de los glaciares en 2010. Cálculo en ArcMap.

QUEBRADA	PEH	2010
Pariaqaqa S	4,36	0,53
Pariaqaqa N	2,38	0,52
Chollquepucro S	3,93	0,11
Chollquepucro W	1,75	0,12
Chollquepucro N	3,89	0,17
Cana	4,96	1,68
Total (km²)	21,27	3,13

Figura 21: resultados de la medida del área de los glaciares en la PEH y 2010. Cálculo en ArcMap.

Las superficies en km^2 ponen de manifiesto una pérdida de superficie desde la PEH hasta 2010 de **- 18,14 km^2** . El símbolo negativo alude, glaciológicamente, a un evento conocido como retroceso glaciar (figura 19).

3.3. ELAs de glaciares en 2010 y ELAs de la PEH y enfriamiento durante la PEH

3.3.1. ELAs AABR 2010

En la tabla de la figura 22 se muestran los resultados obtenidos en la reconstrucción de las ELAs para cada glaciar para el año 2010. Aparecen agrupados por cuencas glaciares y tabulados en columnas vinculadas con el valor de BR que se utilizó en la ponderación. Se ha señalado en color amarillo (5.138 m) la ELA promedio más probable asociada a la menor desviación típica (Osmaston, 2005) y, por consiguiente, estadísticamente representativa para el área de estudio.

	BR=1	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
CANA					
Glaciar 1	5229	5216	5210	5206	5203
2	5092	5074	5065	5059	5056
3	5177	5152	5138	5131	5125
4	5327	5314	5307	5303	5300
5	5101	5106	5110	5112	5114
6	5101	5106	5110	5112	5114
CHOLLQUEPUCRO N					
Glaciar 7	5127	5117	5111	5108	5106
8	4885	4868	4860	4854	4851
9	5305	5314	5323	5329	5333
CHOLLQUEPUCRO W					
Glaciar 10	4806	4803	4807	4810	4812
11	5337	5323	5316	5312	5309
12	5405	5402	5406	5408	5410
13	5094	5079	5072	5067	5064
CHOLLQUEPUCRO S					
Glaciar 14	5144	5129	5122	5117	5114
15	5167	5159	5155	5152	5150
PARIAQQAQ Norte					
Glaciar 16	5060	5050	5055	5059	5061
17	5161	5152	5151	5153	5155
18	5134	5119	5111	5107	5104
PARIAQQAQ Sur					
Glaciar 19	5123	5112	5107	5104	5102
20	5104	5100	5102	5103	5104
21	5044	5028	5020	5016	5013
22	5111	5105	5102	5100	5100
23	5147	5128	5118	5112	5108
ELA MEDIA	5138	5129	5125	5123	5122
Desviación típica	132	133	134	134	134

Figura 22: resultados del cálculo de las ELAs AABR promedio para 2010.

3.3.2. ELAs de los paleoglaciares PEH

En la tabla de la figura 23 se recogen los resultados de las ELAs promedio para la PEH, tabulados en columnas con el valor de BR operadas de la misma forma que las ELAs 2010. El promedio vinculado con la desviación típica más reducida se ha resaltado en color amarillo (4.998m) porque se trata del resultado más probable (Osmaston, 2005) y la ELA del paleoglaciado estadísticamente más representativa.

	BR=1	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
<u>Cana</u>	5040	5008	5008	5017	5024
<u>Chollquepucro N</u>	5023	5023	5082	5135	5141
<u>Chollquepucro W</u>	4950	4953	4960	4968	4973
<u>Chollquepucro S</u>	4750	4767	4776	4781	4785
<u>Pariaqqaqa N</u>	5140	5121	5116	5117	5107
<u>Pariaqqaqa S</u>	4950	4982	4961	4951	4959
ELA MEDIA	4976	4976	4984	4995	4998
desviación típica	195	178	170	168	161

Figura 23: resultados del cálculo de las ELAs AABR para los paleoglaciares de la PEH

La diferencia altitudinal entre la ELA 2010 y 1890 = **140 metros más elevada**. Como se describe en la Evolución glaciar de los Andes Centrales en el Capítulo 1, Thompson (Thompson et al., 2000), entre otros estudios y mediante análisis químicos, dedujo que la fecha del final de la fase de enfriamiento de la PEH habría ocurrido a partir de 1890, aproximadamente.

La variación altitudinal entre ELAs de distintos períodos de tiempo ha sido bastante utilizada para estimar cambios climáticos (Benn et al., 2005).

3.3.3. Enfriamiento durante la PEH (o calentamiento desde la PEH)

La diferencia altitudinal de la ELA actual (5138 m) y la paleoELA (4998 m) en ambos períodos de tiempo (2010 y PEH) es de 140 m. Este indicador, al ser multiplicado por el gradiente térmico vertical (GTV=0,0065°C), sugiere la variación térmica entre ambos períodos, en este caso un enfriamiento en la Pequeña Edad del Hielo de 0,91°C con respecto al presente.

$$\begin{aligned}\downarrow T &= GTV \cdot \downarrow ELA \\ \downarrow T &= 0,0065 \cdot 140 \\ \downarrow T &= 0,91^{\circ}C/m\end{aligned}$$

3.4. Elaboración de tendencias sobre la evolución de los glaciares

Las fórmulas para la elaboración de tendencias o escenarios sobre la evolución de los glaciares se explicaron en el Apartado 2.4 y, además, se utilizó una hoja de cálculo Excel programada por (Úbeda, 2011) para sus previsiones en el Nevado Coropuna. Los resultados se exponen en la figura 24, a través de fechas calculadas para la desaparición de los glaciares recogidas en la última columna (“**H₀ año**”) de la derecha de la tabla.

Con respecto a las tasas de deglaciación basadas en el incremento de las ELAs, los cálculos se realizaron en dos escenarios de futuro: **Escenario 1** (figura 25) en donde se emplearon los incremento de la ELA observados entre la PEH y 2010 y el **Escenario 2** (figura 26) en donde se simularon tasas equivalentes con un triple incremento a las observadas entre la PEH y 2010. (Úbeda, 2011) y (Giraldez, 2011) utilizaron tasas de deglaciación basadas en el análisis de glaciares utilizando más de dos períodos, sus trabajos se basaron en imágenes aéreas y delimitaciones de los años 50', 60' y 80' del siglo XX y de la PEH, entre otros.

La simulación del Escenario 2 se justifica por la carencia de un número más extenso de fechas observadas para analizar la evolución de los glaciares. El factor de multiplicación de las tasas (x3) fue seleccionado ya que en el trabajo de (Úbeda, 2011) las tasas de deglaciación más recientes (deducidas de la serie 1986-2007) triplicaron las tasas de deglaciación deducidas de la serie más larga (desde la PEH hasta 2007).

Las tasas de deglaciación para ambos escenarios se resuelven con la siguiente fórmula:

- Tasa de deglaciación en base a la superficie:

$$\begin{aligned} \mathbf{Td\ S} &= \Delta\mathbf{S} / \mathbf{R} \\ \Delta\mathbf{S} &= 18,14 \text{ km}^2 / 120 \text{ años} \\ \mathbf{R} &= 120 \text{ años (2010 - 1890)} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Td\ S= 1.259,72\ m}^2/\text{año}$$

- Tasa de deglaciación en base a la variación altitudinal de la ELA:

$$\begin{aligned} \mathbf{Td\ ELA} &= \sum \mathbf{ELA} / \mathbf{R} \\ \mathbf{Td\ ELA} &= 140 \text{ m} / 120 \text{ años} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Td\ ELA= 1,17\ m/año}$$

PRONÓSTICOS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS GLACIARES BASADOS EN LAS SUPERFICIES

SPEH: 21.27

S 2010 (m): 3.13

Escenario 1: tasas de deglaciación observadas entre PEH y 2010

Glaciares	Paloglaciares	R	S 2010	S PEH	ΔS	Td	H ₀
2010	PEH	(años)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ² /año)	(año)
Glaciar 1-2	Cana	120	1,68		18.14	0.151	2019
Glaciar 3	Cana	120	1,68		18.14	0.151	2014
Glaciar 4	Cana	120	1,68		18.14	0.151	2010
Glaciar 5	Cana	120	1,68		18.14	0.151	2011
Glaciar 6	Cana	120	1,68		18.14	0.151	2010
Glaciar 7	Chollquepucro N	120	0,17		18.14	0.151	2015
Glaciar 8	Chollquepucro N	120	0,17		18.14	0.151	2014
Glaciar 9	Chollquepucro N	120	0,17		18.14	0.151	2011
Glaciar 10	Chollquepucro W	120	0,12		18.14	0.151	2010
Glaciar 11	Chollquepucro W	120	0,12		18.14	0.151	2010
Glaciar 12	Chollquepucro W	120	0,12		18.14	0.151	2010
Glaciar 13	Chollquepucro W	120	0,12		18.14	0.151	2010
Glaciar 14	Chollquepucro S	120	0,11		18.14	0.151	2011
Glaciar 15	Chollquepucro S	120	0,11		18.14	0.151	2022
Glaciar 16	Pariaqqaqa N	120	0,52		18.14	0.151	2016
Glaciar 17	Pariaqqaqa N	120	0,52		18.14	0.151	2010
Glaciar 18	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2011
Glaciar 19	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2011
Glaciar 20	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2011
Glaciar 21	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2011
Glaciar 22	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2011
Glaciar 23	Pariaqqaqa S	120	0,53		18.14	0.151	2014

R-rango de la serie (años) · S2010-superficie en 2010 (km²) · S PEH-superficie en la PEH (km²)

ΔS PEH-incremento de la superficie entre la PEH y 2010 (km²)

Td-tasa de incremento de la superficie ($\text{km}^2/\text{año}$) · H_0 -fecha de desaparición del glaciar

Figura 24: pronósticos de futuro basados en las tendencias observadas en las superficies. De izquierda a derecha en las columnas se indican la denominación de los glaciares y paleoglaciares, el tiempo transcurrido o rango de la serie, las superficies en 2010 y la PEH, el incremento de las superficies entre ambas fases, las tasas de deglaciación deducidas y la fecha de desaparición de los glaciares.

PRONÓSTICOS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS GLACIARES

EN EL FUTURO BASADOS EN LAS ELAs

paleoELA PEH (m): 4998

ELA 2010 (m): 5138

Escenario 1: tasas de deglaciación observadas entre PEH y 2010

	R (años)	ΔELA (m)	Td (m/año)	Zmáx (m)	ELA (m)	Zp (m)	t (años)	H₀ (año)
Glaciar 1-2	120	140	1.167	5500	5138	362	310	2320
Glaciar 3	120	140	1.167	5350	5138	212	182	2192
Glaciar 4	120	140	1.167	5463	5138	325	279	2289
Glaciar 5	120	140	1.167	5217	5138	79	68	2078
Glaciar 6	120	140	1.167	5196	5138	58	50	2060
Glaciar 7	120	140	1.167	5500	5138	362	310	2320
Glaciar 8	120	140	1.167	5642	5138	504	432	2442
Glaciar 9	120	140	1.167	5650	5138	512	439	2449
Glaciar 10	120	140	1.167	5461	5138	323	277	2287
Glaciar 11	120	140	1.167	5494	5138	356	305	2315
Glaciar 12	120	140	1.167	5360	5138	222	190	2200
Glaciar 13	120	140	1.167	5238	5138	100	86	2096
Glaciar 14	120	140	1.167	5302	5138	164	141	2151
Glaciar 15	120	140	1.167	5650	5138	512	439	2449
Glaciar 16	120	140	1.167	5520	5138	382	327	2337
Glaciar 17	120	140	1.167	5257	5138	119	102	2112
Glaciar 18	120	140	1.167	5268	5138	130	111	2121
Glaciar 19	120	140	1.167	5242	5138	104	89	2099
Glaciar 20	120	140	1.167	5486	5138	348	298	2308
Glaciar 21	120	140	1.167	5317	5138	179	153	2163
Glaciar 22	120	140	1.167	5477	5138	339	291	2301
Glaciar 23	120	140	1.167	5489	5138	351	301	2311

Figura 25: pronósticos de futuro basados en las tasa de deglaciación según las tendencias de las ELAs (escenario 1). De izquierda a derecha en las columnas se indican la denominación de los glaciares, el incremento de la ELA entre la PEH y 2010 (Δ ELA), las tasas anuales de incremento de la ELA (Td), la altitud máxima de cada glaciar (Zmáx), el valor de la ELA en 2010 (ELA), el desnivel entre la ELA de 2010 y Zmáx (Zp), el tiempo necesario para que la ELA ascienda sobre Zmáx (t) y la fecha de desaparición de los glaciares (H_0).

PRONÓSTICOS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS GLACIARES

EN EL FUTURO BASADOS EN LAS ELAs

paleoELA PEH (m): 4998

ELA 2010 (m): 5138

Escenario 2: triple de las tasas de deglaciación observadas entre PEH y 2010

	R (años)	ΔELA (m)	Td (m/año)	Zmáx (m)	ELA (m)	Zp (m)	t (años)	H0 (año)
Glaciar 1-2	120	140	3.500	5500	5138	362	103	2113
Glaciar 3	120	140	3.500	5350	5138	212	61	2071
Glaciar 4	120	140	3.500	5463	5138	325	93	2103
Glaciar 5	120	140	3.500	5217	5138	79	23	2033
Glaciar 6	120	140	3.500	5196	5138	58	17	2027
Glaciar 7	120	140	3.500	5500	5138	362	103	2113
Glaciar 8	120	140	3.500	5642	5138	504	144	2154
Glaciar 9	120	140	3.500	5650	5138	512	146	2156
Glaciar 10	120	140	3.500	5461	5138	323	92	2102
Glaciar 11	120	140	3.500	5494	5138	356	102	2112
Glaciar 12	120	140	3.500	5360	5138	222	63	2073
Glaciar 13	120	140	3.500	5238	5138	100	29	2039
Glaciar 14	120	140	3.500	5302	5138	164	47	2057
Glaciar 15	120	140	3.500	5650	5138	512	146	2156
Glaciar 16	120	140	3.500	5520	5138	382	109	2119
Glaciar 17	120	140	3.500	5257	5138	119	34	2044
Glaciar 18	120	140	3.500	5268	5138	130	37	2047
Glaciar 19	120	140	3.500	5242	5138	104	30	2040
Glaciar 20	120	140	3.500	5486	5138	348	99	2109
Glaciar 21	120	140	3.500	5317	5138	179	51	2061
Glaciar 22	120	140	3.500	5477	5138	339	97	2107
Glaciar 23	120	140	3.500	5489	5138	351	100	2110

Figura 26: pronósticos de futuro basados en las tasas de deglaciación según el comportamiento de las ELAs (escenario 2). De izquierda a derecha en las columnas se indican la denominación de los glaciares, el incremento de la ELA entre la PEH y 2010 (Δ ELA), las tasas anuales de incremento de la ELA (Td), la altitud máxima de cada glaciar (Zmáx), el valor de la ELA en 2010 (ELA), el desnivel entre la ELA de 2010 y Zmáx (Zp), el tiempo necesario para que la ELA ascienda sobre Zmáx (t) y la fecha de desaparición de los glaciares (H₀).

4. DISCUSIÓN

Los glaciares tropicales reaccionan rápidamente a los cambios en la precipitación y de temperatura (Kaser, 2020). En este capítulo se pretende analizar las consecuencias del calentamiento global reflejadas en el área de los glaciares de la Cordillera Pariaqqa y sus ELAs correspondientes dada la sensibilidad de los glaciares para revelar cuestiones clave acerca del calentamiento global basados en los parámetros obtenidos para dos etapas: la Pequeña Edad del Hielo y 2010.

4.1. Superficies y ELAs de los glaciares y paleoglaciares y la deducción del enfriamiento durante la PEH

Al comparar las superficie de los glaciares en 2010 ($3,13\text{km}^2$) y en la PEH ($21,27\text{ km}^2$) se puede deducir que las masas están experimentando una marcada tendencia de retroceso y, en este sentido, de persistir este comportamiento en las próximas décadas, se podría asistir a una severa reducción de las actuales superficies glaciares.

En cuanto al estado actual de las morrenas, los procesos fluviales y periglaciares no han sido lo suficientemente activos ni extensos como para alterar de manera significativa la morfología de los principales depósitos morrénicos, estando éstos en un estado bastante similar a tal como fueron depositados.

La destrucción, leve o parcial, de la fuente de agua glaciar aprovechada durante las últimas décadas y los riesgos que sus deshielos repentinos implican, sea por la aparición de lagunas en áreas de fuerte desnivel o por la carencia de una superficie glaciar que amortigüe períodos de precipitación intensa, son los impactos más conocidos por la reducción de la superficie glaciar. Por una parte se reduce la superficie de reserva de agua para el uso de agua potable, de regadío o para la industria y por otra parte, el deshielo repentino provoca un riesgo de avenidas.

En el área de estudio han aparecido por lo menos seis cuerpos de agua de origen glaciar después de la PEH, como la laguna Cana y San Juan, que la comparación multitemporal de imágenes satelitales (Landsat 1997 y Google earth 2010) demuestra que se formó después de 1997 (figura 24).

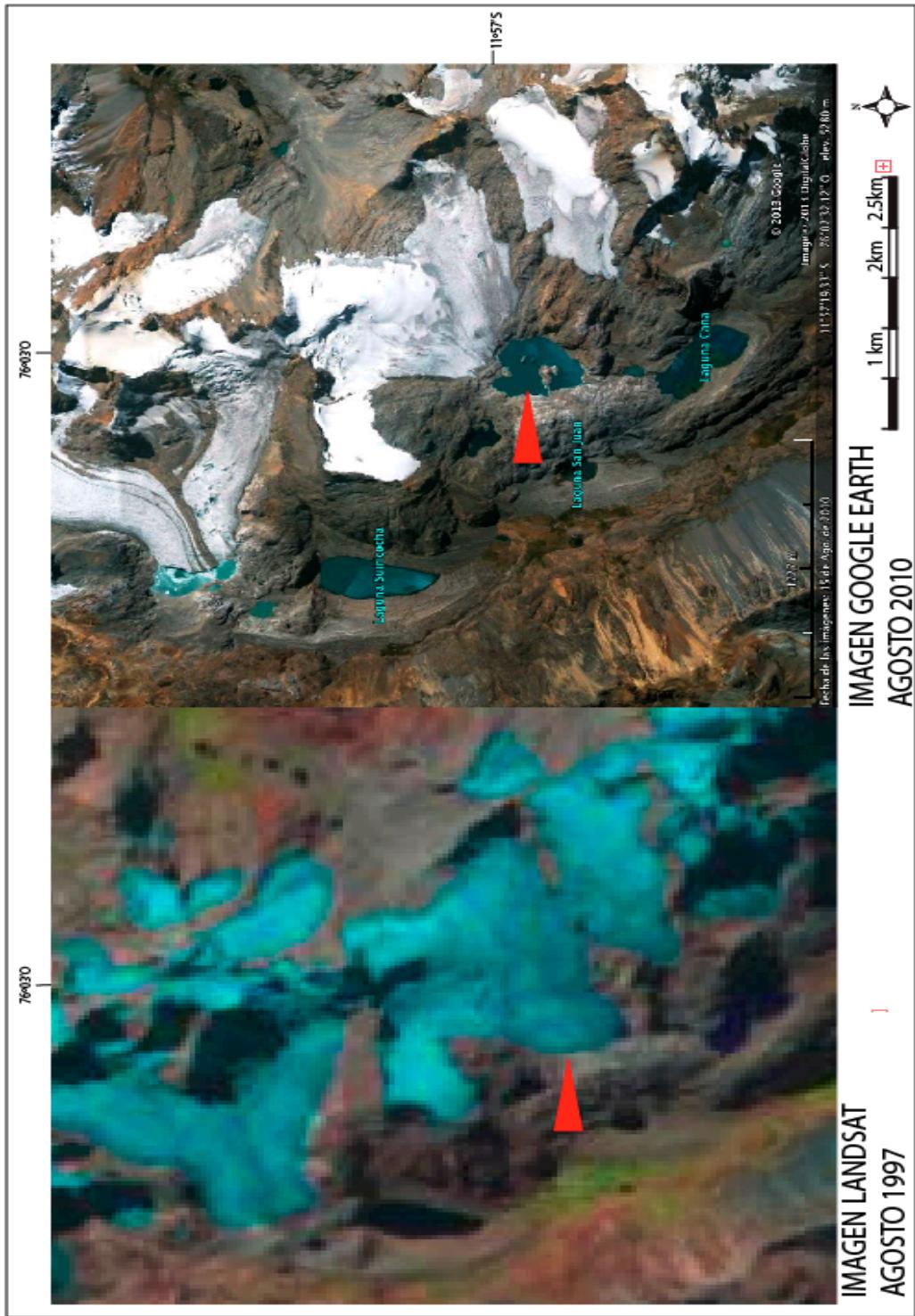


Figura 24: comparación de imagen Landsat en 1997 y Google earth 2010. El triángulo rojo indica la localización de la laguna San Juan*, cuya aparición se relaciona con la retirada de los glaciares desde esa posición después de 1997. (* es necesario confirmar que San Juan haga referencia a esta laguna y no a la localizada inmediatamente debajo de ella. Los topónimos utilizados por Google earth y mapas topográficos no aclararon este punto).

Existen diversos estudios de los glaciares tropicales en los Andes Centrales, de ellos, se eligieron dos trabajos conocidos por haber utilizado la misma metodología que la antes descrita y, también, por ser glaciares localizados en zonas más septentrionales (Giraldez, 2011) como la Cordillera Blanca, en Ancash y meridionales (Úbeda, 2011; Campos, 2012; García Gutiérrez, 2013) como el Nevado Coropuna, en Arequipa, con el fin de comparar los distintos escenarios climáticos de esta región de la Cordillera de los Andes (Andes Centrales) con la Cordillera Pariaqaqa, lo mismo que con publicaciones científicas e informes de organismos peruanos e internacionales (IPCC, 2007).

Además de la extensión de la superficie, uno de los mejores indicadores para deducir los efectos del cambio climático en las masas de hielo es la ELA, porque se relaciona de forma directa con la evolución de los glaciares y la altitud de su área fuente. En ese sentido cabe destacar la excelente correlación que muestran los resultados alcanzados por el presente trabajo en la cordillera Pariaqaqa (12°S) con los obtenidos en el Nevado Hualcán (9°S) por (Giraldez, 2011) y en el Nevado Coropuna (16°S) por (Úbeda, 2011). Teniendo en cuenta las diferencias entre las fechas de las imágenes de satélite que fueron empleadas como base para ambos estudios (2003 y 2010, respectivamente), el resultado de la ELA para el Nevado Hualcán (5124 m) puede considerarse idéntico a la ELA de la cordillera Pariaqaqa (5238 m) y lo mismo sucede con los resultados para la PEH. Durante el último avance de los glaciares (Giraldez, 2011) encontró una paleoELA de 4994 m en el Nevado Hualcán y en este trabajo se ha reconstruido un valor de 4998 m para la cordillera Pariaqaqa. Por otra parte las ELAs y paleoELAs de esas montañas de la Cordillera Blanca y la Cordillera Central son notablemente más bajas que el valor de los mismos parámetros obtenido por (Campos, 2012; García Gutiérrez, 2013; Úbeda, 2011) en el Nevado Coropuna (figura 25). En las vertientes SW y SE de ese complejo volcánico, con la misma orientación que en las áreas estudiadas en el Nevado Hualcán y la cordillera Pariaqaqa, la ELA para 2007 era 5834 y 5862 m y la paleoELA durante la PEH 5776 m. A pesar de presentar un desnivel de entre 700 y 800 m puede considerarse que los resultados son coherentes entre sí porque están reflejando el incremento de la aridez hacia el sur de los Andes Centrales y es un hecho reconocido que la ELA se eleva en el mismo sentido que disminuye la humedad del clima (Benn et al., 2005).

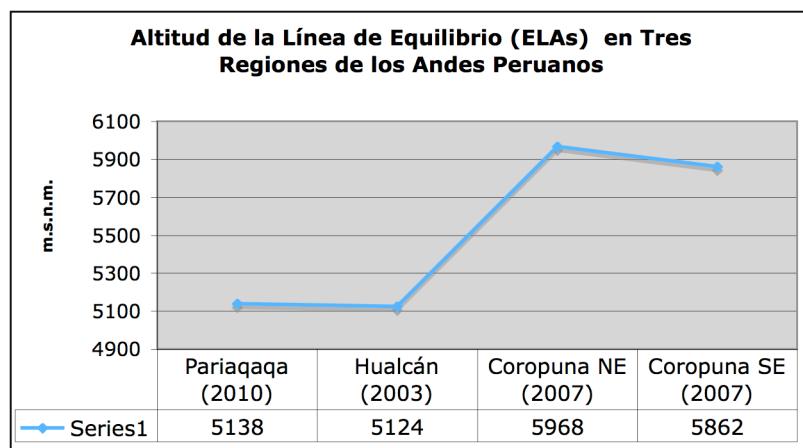


Figura 25: gráfico comparando las estimaciones de las ELAs para la cordillera Pariaqaqa (este trabajo), el Nevado Hualcán (Giraldez, 2011) y el Nevado Coropuna (Úbeda, 2011).

La coherencia de los resultados de las estimaciones de las ELAs actuales y las paleoELAs de la PEH del presente trabajo y las obtenidas por (Giraldez, 2011) y (Úbeda, 2011) demuestra que los métodos empleados son una alternativa válida para analizar el impacto del cambio climático en los glaciares de los Andes Centrales. Esa afirmación parece todavía más acertada cuando se analizan los datos de la depresión de la paleoELA y el enfriamiento del clima durante el último avance de las masas de hielo.

Mientras que (Giraldez, 2011) y (Úbeda, 2011) encontraron exactamente el mismo desnivel entre las ELAs actuales y las paleoELAs de la PEH (130 m), en este trabajo se ha estimado un valor de 140 m. Es una diferencia muy reducida, de tan sólo 10 m, que quizás se relacione con la menor altitud de las montañas de la cordillera Pariaqaqa (<5800 m) con respecto al Nevado Hualcán y el Nevado Coropuna, donde el área fuente de las masas de hielo supera ampliamente los 6000 m de altitud.

La estimación del enfriamiento durante la PEH, deducida en base al desnivel de la paleoELA durante esa fase, también refleja una gran precisión en los métodos empleados. (Úbeda, 2011) obtuvo una tasa de 0,72°C que se diferencia por sólo 0,02°C del promedio de las observaciones instrumentales disponibles (0,74°C), estimado por (IPCC, 2007). Aunque los resultados de (Giraldez, 2011) y (García Gutiérrez, 2013) son menos precisos (0,85°C y 0,88°C, respectivamente), al igual que la estimación que se ha realizado en el presente trabajo (0,91°C) las diferencias pueden atribuirse a que (Úbeda, 2011) utilizó un gradiente térmico vertical (0,0084°C) deducido de los registros de sensores instalados sobre el terreno y el resto de trabajos, a falta de registros locales, se basaron en el gradiente térmico vertical promedio de la Tierra (0,0065°C). A pesar de todo tienen diferencias >0,06°C y probablemente se aproximen en mayor medida a las observaciones instrumentales cuando puedan producir estimaciones basadas en registros realizados por sensores como los que usó (Úbeda, 2011).

4.2. La cronología de la PEH

(Matthes, 1939) fue el primer investigador que empleó el término Little Ice Age-LIA (Pequeña Edad de Hielo-PEH en castellano) para hacer referencia a los avances de los glaciares de las latitudes medias ocurridos entre los siglos XVI y XVII. En los Andes Centrales (Andes tropicales) sólo se han realizado estudios sobre la PEH con técnicas de datación basadas en la presencia de líquenes colonizadores de sedimentos en dos Cordilleras, la Cordillera Blanca y la Cordillera Real de Bolivia (Jomelli et al., 2008; Rabaté et al., 2008; Solomina et al., 2007) (figura 27) a \pm 350 kilómetros al Norte y \pm 1000 km al Sur de Pariaqaqa, respectivamente. Por ese motivo es necesario, en primer lugar, encontrar dichas especies en las morrenas locales para, a continuación, poder determinar sus tasas de crecimiento y con ello, una datación más específica.

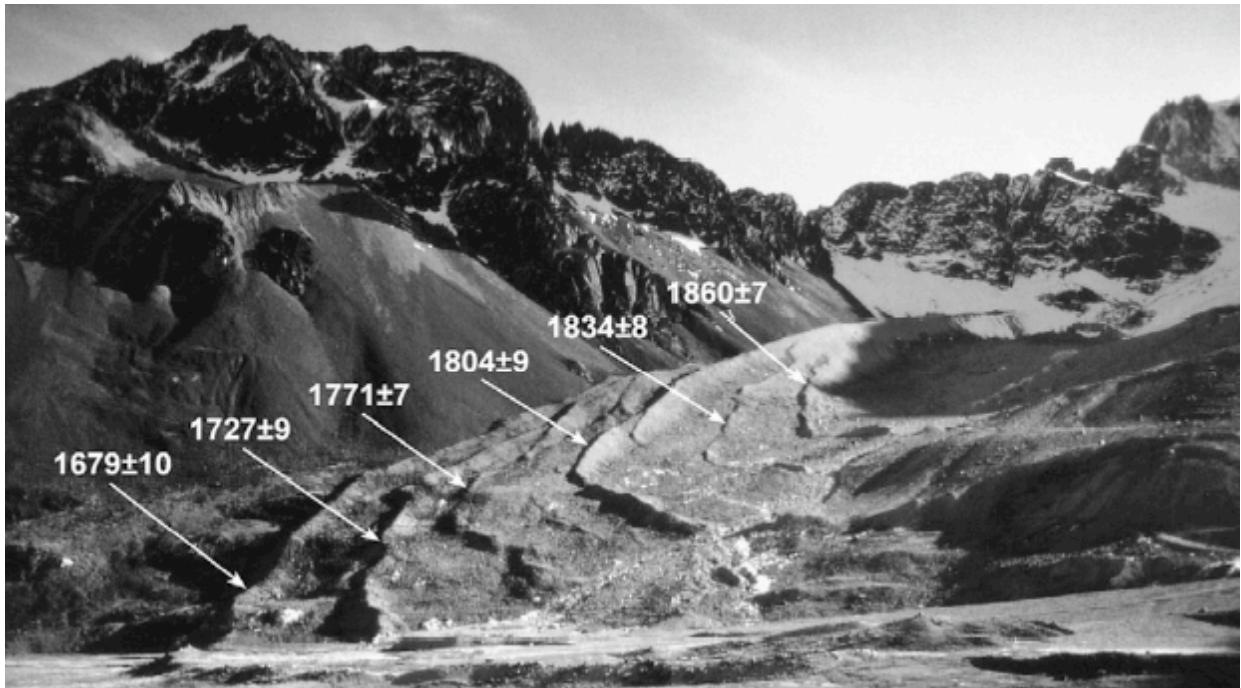


Figura 27: depósitos morrénicos frontales de la Pequeña Edad del Hielo datados con el método liconométrico por (Rabaté et al., 2008) en la Cordillera Real de Bolivia. Las fechas marcadas en color blanco corresponden a las atribuidas a los avances de los glaciares, con indicación del rango de error cometido en las estimaciones (\pm).

(Rabaté et al., 2008) consideraron que los avances de los glaciares en los trópicos tuvieron la misma magnitud que en las latitudes medias, en este caso el cambio climático debió ser semejante en todo el planeta. La dinámica del clima en los Andes Centrales, y por tanto la de sus glaciares, está fuertemente influida por el factor altitudinal y por las tendencias de aridez, mayores hacia el sur y hacia el oeste de la Cordillera, como se ha demostrado en el apartado 4.1 al comparar las ELAs obtenidas por este y otros realizados en el norte y el sur del Perú.

Por ese motivo y por la falta de datos referidos al área de estudio no podemos conocer con exactitud la fecha en que pudieron ocurrir los últimos avances cartografiados en la cordillera Pariaqaqa. Lo más probable es que ocurrieran durante la PEH, pero la confirmación de esa hipótesis requeriría que se realizasen estudios de liquenometría.

No obstante es posible afirmar que las pulsaciones glaciares que generaron las morrenas delimitadas sí ocurrieron entre 1500 y 1890. Durante ese periodo la tasa δO^{18} de los testigos de hielo de los nevados Huascarán y Quelccaya analizados por (Thompson et al., 2000) mostraron valores negativos y esos autores consideraron que podría corresponderse a la PEH en los Andes Centrales.

También es necesario señalar que la altitud de la Cordillera Pariaqaqa es menor que otras montañas de los Andes Centrales, como los lugares donde se desarrollaron los trabajos citados en el punto 4.1. Teniendo en cuenta esta menor altitud, quizás pueda considerarse que los glaciares de Pariaqaqa y Chollquepucro avanzaron por última vez en el período frío que fue especialmente favorable para la expansión glaciar, de hecho, (Úbeda, 2011) también se basó en esta teoría para estimar los últimos avances en el Nevado Coropuna, en donde, como consecuencia de la altitud y a la aridez de esa región, no ha sido posible encontrar líquenes en las morrenas de la PEH. Bajo esta premisa, buscó datos de la acumulación de nieve registrada en los testigos de hielo del glaciar Quelccaya durante los últimos mil años (Thompson, 1992), con los que construyó el gráfico que se muestra en la figura 28. La curva del glaciar Quelccaya muestra un periodo de mayor acumulación entre finales de los siglos XV y XVII durante el que (Úbeda, 2011) consideró que debieron ocurrir los últimos avances en el Nevado Coropuna y es muy posible que también sucediesen las pulsaciones que depositaron las morrenas PEH en la cordillera Pariaqaqa.

Estas serían los años en los que los glaciares avanzaron por última vez y probablemente se hayan mantenido en esas posiciones hasta finales del siglo XIX, momento en el que finalizaron los valores negativos de la tasa $\delta^{18}\text{O}$ de los testigos de hielo del Huascarán y Quelccaya (Thompson et al., 2000). Por estos motivos, se ha tomado como referencia del año 1890 para definir el comienzo del periodo de calentamiento actual y para elaborar pronósticos sobre la evolución de los glaciares de Pariaqaqa.

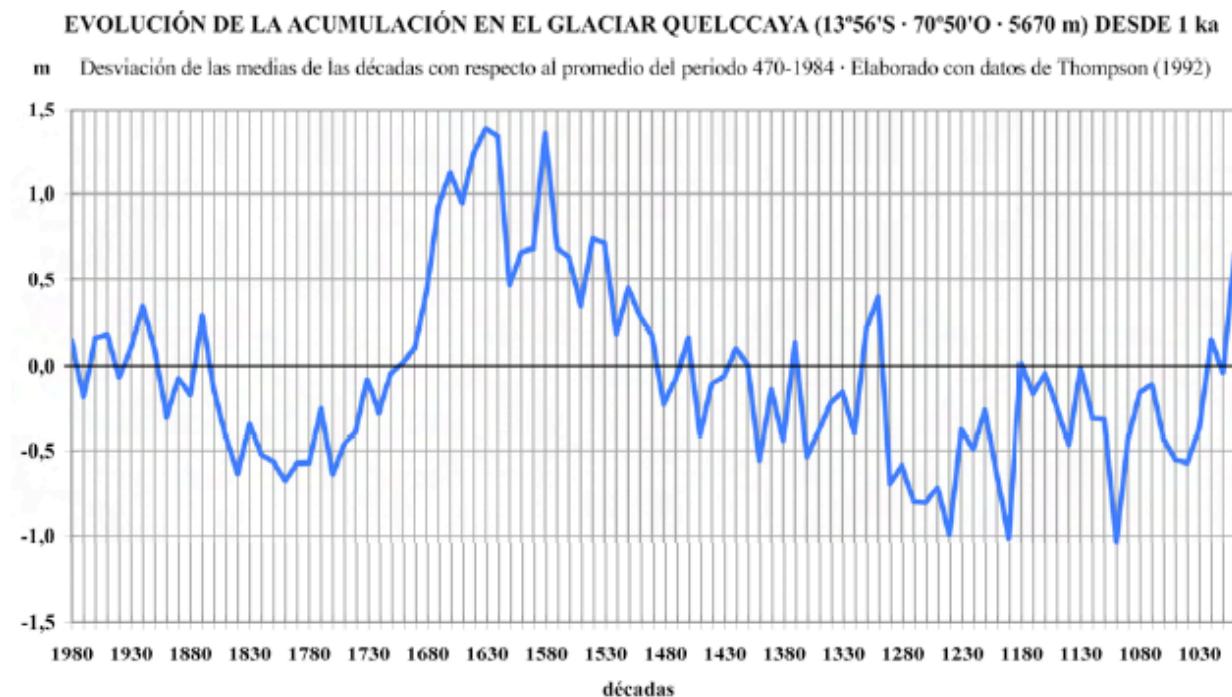


Figura 28: desviaciones de la media de la acumulación por década registrada en el glaciar Quelccaya con respecto a la del periodo 470-1984 (en metros de agua equivalente). Elaborado por (Úbeda, 2011) con datos de (Thompson, 1992).

4.3. La evolución de los glaciares y sus posibles escenarios

Según la Estrategia Nacional de Cambio Climático del CONAM (Comisión Nacional del Cambio Climático), los recursos hídricos de alta montaña se han visto afectados en los últimos treinta años por una pérdida de hasta un 80% de superficies glaciares más pequeñas en la Cordillera Central y es muy probable que los glaciares con áreas relativamente pequeñas y por debajo de los 5.500 m de altitud puedan desaparecer antes de 2015, en caso de que prevalezcan las condiciones climáticas actuales.

Sin embargo los pronósticos que se han elaborado en los glaciares de la Cordillera Pariaqaqa sobre la evolución de los glaciares basados en las tendencias observadas en las ELAs entre la PEH y 2010 (escenario 1) indican que las zonas de acumulación de los glaciares desaparecerían en fechas posteriores al siglo XXI, con excepción del glaciar 6 (2060) y el glaciar 19 (2099).

La aparente incoherencia de estos resultados con los previstos por la CONAM puede interpretarse como una demostración de la acentuación de la tendencia a la deglaciación durante las últimas décadas siendo, entonces, el escenario 2 (x3) más probable que el escenario 1. Los pronósticos del escenario 2 indican la desaparición de sólo el 50% de los glaciares, en comparación con el 80% propuesto por el CONAM para antes de finales del presente siglo (figura 26). Las investigaciones que se desarrollen en el futuro en la cordillera Pariaqaqa podrían solucionar esta incongruencia tomando como referencia fechas más recientes, aunque las áreas de montaña del Perú tendrían que contar con un mayor número de fotografías aéreas (actualmente de los años 50') y de imágenes de satélite (actualmente desde los años 70').

Lamentablemente las previsiones basadas en las tendencias de las superficies (figura 24) parecen bastante más acertadas y coinciden con los pronósticos de la CONAM, de lo que se deduce que en la fecha prevista en el presente trabajo se podría asistir a una severa o completa desaparición de varios de los glaciares cartografiados para el año 2010 (probablemente, como asevera la CONAM, los de menor superficie). La previsión podrá comprobarse mediante trabajos de campo o a la espera de una mayor variedad de imágenes satelitales y fotografías aéreas multitemporales.

Las perspectivas sobre la evolución del clima durante las próximas décadas, a escala global y local (en la cordillera de los Andes Centrales), no hacen sino confirmar esa posibilidad.

Según la Declaración sobre el Estado del Clima Mundial de la Organización Mundial de Meteorología (OMM), el año 2012 fue el noveno año más cálido desde 1850, y el vigésimo séptimo año consecutivo que registra la temperatura de la superficie de la tierra y del océano por encima de la media de 14°C en el período 1961-1990. El resultado propuesto por la OMM, también reafirma al escenario 2 como la mejor propuesta, al confirmar que el ascenso de la temperatura en la superficie de la Tierra no se ha comportado de forma lineal a lo largo del siglo XX sino que se ha acelerado hacia finales del mismo.

4.3.1 Aportaciones de las actividades antrópicas al cambio climático

El aire del departamento de Lima es el más contaminado de América del Sur, según el último informe de la OMM. Con respecto a este informe, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ha reconocido que la presencia de polvo atmosférico en Lima Metropolitana ($14,1 \text{ tk}^2/\text{mes}$) es casi tres veces mayor al umbral recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esta contaminación tan elevada proviene, principalmente, del parque automotor y de las industrias, con más de 9 millones de habitantes y según la encuesta anual de Lima Cómo Vamos 2011, el segundo problema percibido como el más importante es la contaminación ambiental.

Son cuatro las variables que alteran la dinámica del sistema climático terrestre: 1) el dióxido de carbono (CO_2); 2) el metano (CH_4); 3) el óxido de nitrógeno (N_2O) y 4) los halocarbonos (grupo de gases contenedores de flúor, cloro y bromo) (Figura 29). Todos estos son en gran medida producidos por los sistemas de transportes urbanos, sistemas productivos y extractivos.

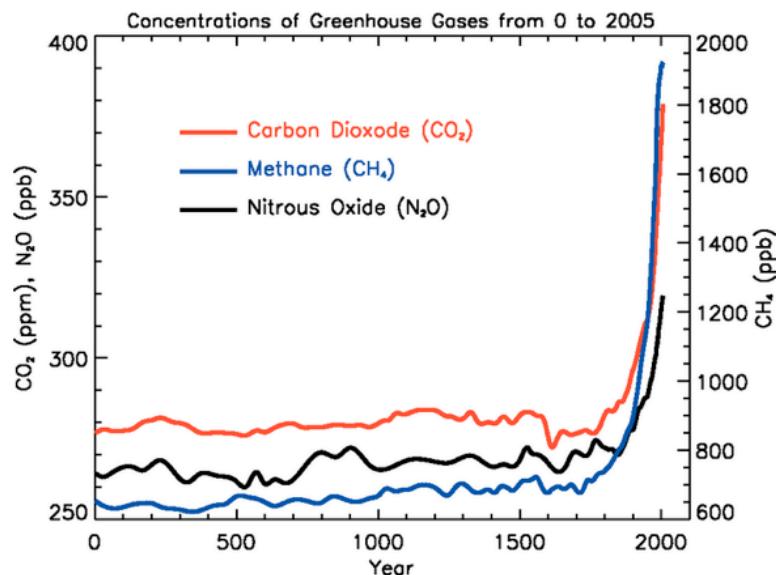


Figura 29: Muestras más antiguas de los principales gases de efecto invernadero concentrados en la atmósfera durante los últimos 2.000 años. El aumento comienza a partir de 1750 y es atribuido, de forma consensuada, a las actividades productivas de la actual era industrial. Fuente: capítulo 2 y 6 del Reporte de la Cuarta Evaluación del Cambio Climático 2007, IPCC.

4.4 Planificación glaciológica nacional

El interés de la planificación de los recursos hídricos de montaña, en este caso los glaciares, se corresponde a la necesidad de prever la abundancia o escasez de estas fuentes de agua sólida, los riesgos que sus desagües repentinos representan a las poblaciones aledañas a los cauces de la red hidrográfica o a las montañas y porque los glaciares han venido representando una superficie acumuladora de la precipitación sorpresiva o intensa. Estas dos implicancias, los glaciares como recurso hidrológico y como riesgo deben ser estudiados, cartografiadas e incluidos los distintos Planes de Ordenación provinciales, departamentales, regionales y nacionales.

Dentro de las políticas de adaptación al cambio climático y control de riesgos glaciares, se ha incorporado el “Proyecto Glaciares” desde noviembre 2011 a través de la Unidad de Glaciología de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los gobiernos regionales de Ancash y Cusco y las Universidades Santiago Antúnez de Mayolo, San Antonio Abad del Cusco y Agraria La Molina. El proyecto está a cargo del Consorcio CARE Perú y la Universidad de Zurich, sus objetivos son el fortalecimiento de las capacidades técnicas operativas para el monitoreo de los glaciares de manera que la información pueda ser difundida.

Las actuaciones del Proyecto se dividen en tres líneas principales:

- a)** control de riesgos locales de origen glacial (monitoreo integrado, sistemas de alarma temprana, planes de adaptación al cambio climático y gestión de riesgos),
- b)** fortalecimiento de recursos humanos (postrago en glaciología y gestión de riesgos, consorcio de universidades nacionales y extranjeras, intercambio de información a través de redes y publicaciones científicas).
- c)** fortalecimiento institucional (proyectos de investigación glaciológica, inversiones públicas en monitoreo glacial y gestión pública fortalecida).

Son dos las zonas de intervención de este Proyecto: los glaciares en el departamento de Ancash (Cordillera Blanca) y Cusco (≈ 400 km al sur de Pariaqqaqa) (Figura 30).

El Perú cuenta con una Estrategia Nacional para el Cambio Climático dirigida por una Comisión Nacional para el Cambio Climático (CONAM), en donde se ha considerado los recursos hídricos de alta montaña como una pieza clave para el abastecimiento de agua de muchas ciudades en la costa. El Plan ha definido 11 Líneas Estratégicas en orden de prioridad, siendo la más importante el “la promoción y desarrollo de la investigación científica, tecnológica, social y económica sobre vulnerabilidad, adaptación y mitigación respecto al cambio climático”. Finalmente,

La Agencia Nacional del Agua del Perú tiene pendiente la culminación del Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) de la cuenca Chillón-Rímac-Lurín (cuenca de Chollquepucro y Pariaqqaqa).



Figura 30: El Proyecto Glaciares se aplica a dos zonas de intervención, en color rojo en el mapa: el departamento de Ancash, en la costa en donde se sitúa la Cordillera Blanca y Cordillera Negra y en el departamento de Cusco, al sur.

Conclusiones:

Los cálculos de las superficies indican que los glaciares se han retirado $18,14 \text{ km}^2$ desde la PEH hasta 2010, correspondiente a una tasa de deglaciación de $1.259 \text{ m}^2/\text{año}$. Esto parte de la hipótesis de que la tasa de deglaciación haya sido constante en el período de años transcurridos desde el fin de la PEH hasta el año 2010.

Durante la última fase de reavance glaciar, la temperatura era menor que la actual en $0,91^\circ\text{C}$. Este resultado es semejante al $0,74^\circ\text{C}$ deducido por el IPCC sobre el calentamiento global de la serie 1905-2006.

Si bien en el Hemisferio Sur los estudios directos sobre superficies glaciares no son tan frecuentes como en los glaciares de climas templados, una de las razones sería la menor superficie continental que ocupan los glaciares tropicales y otra razón podría ser la falta de cultura científica y de infraestructuras técnicas de los países en donde están situados, lo que no favorece su estudio sistemático y continuos.

La sensibilidad de los glaciares con respecto a los cambios del clima son un claro apoyo para la investigación en temas relacionados a la vulnerabilidad, calentamiento global y sus efectos.

Existe una creciente demanda de agua por parte de la población y del sector industrial, mientras que el control de cuencas y de escorrentía superficial carece de estudios de modelización hidrológica, habiéndose adaptado el sistema a una planificación de corto plazo.

Glosario de términos glaciológicos

En este apartado se explican, en forma de glosario, algunos conceptos climatológicos y glaciológicos básicos que es necesario comprender para describir e interpretar el impacto del cambio climático en los glaciares y que serán aplicados en el presente estudio sobre los glaciares de la Cordillera Pariaqaqa.

Área de Ablación: es el área más baja de un glaciar y en donde la pérdida de masa excede su ganancia. La ablación es la pérdida de masa glaciar ocurrida por procesos como la fusión, fuga, sublimación, evaporación, erosión, etc.

Área de Acumulación: es el área más alta de un glaciar y en donde la ganancia de nieve excede su pérdida. La acumulación ocurre gracias al aporte de nieve por transporte aéreo de glaciares contiguos, precipitaciones o firnificación. El área de acumulación de un glaciar está permanentemente cubierto de nieve y suele ser la parte más alta.

Balance de masa: es la cuantificación del cambio en una masa glaciar en un momento dado y para un período de tiempo específico. Es decir, es la diferencia entre la acumulación y la ablación, el resultado es un valor positivo o negativo. El valor de balance de masa en la Línea de Equilibrio es 0.

ELA: es la altitud de la línea de equilibrio (equilibrium line altitude). Línea teórica que separa el área de acumulación (con valor positivo de balance de masa) del área de ablación (con valor negativo de balance de masa) en una superficie glaciar (Figura 1). Su posición en los Andes Centrales varía en función de la latitud y la orientación. Por definición en el nivel de la ELA el balance de pérdidas y ganancias se equilibra ($b=0$ mm).

Estriamiento: múltiples marcas lineales, generalmente paralelas, talladas por rocas congeladas sobre el terreno (roca) por el que fluye. Las morrenas y las estriás son elementos geomorfológicos clave para la interpretación de los antiguos flujos glaciares.

Glaciar: es una acumulación grande y perenne de hielo, nieve, rocas, sedimento y agua líquida originada sobre el terreno y con un movimiento descendente por influencia de su propio peso y gravedad. Los glaciares son clasificados según su tamaño, su ubicación y régimen térmico. Los glaciares expuestos en el presente trabajo se clasifican por su régimen climático (glaciares tropicales).

Morrena: es un depósito de sedimentos mezclados y no estratificados que se formaron en la superficie a partir de la acción o contacto directo del hielo de un glaciar. Se pueden reconocer varios tipos de morrenas en base a su posición con respecto al glaciar (Figura 2).

Terminal: es el margen más bajo, final o extremidad de un glaciar. También conocido como pie glaciar.

Holoceno: es la época geológica actual, comenzó hace aproximadamente 12.000 años.



Figura 1: Posición de la ELA en un glaciar

Pequeña Edad del Hielo (PEH): es el último período de expansión de glaciares en superficies continentales y polares. Se conoce también como Neoglaciación.

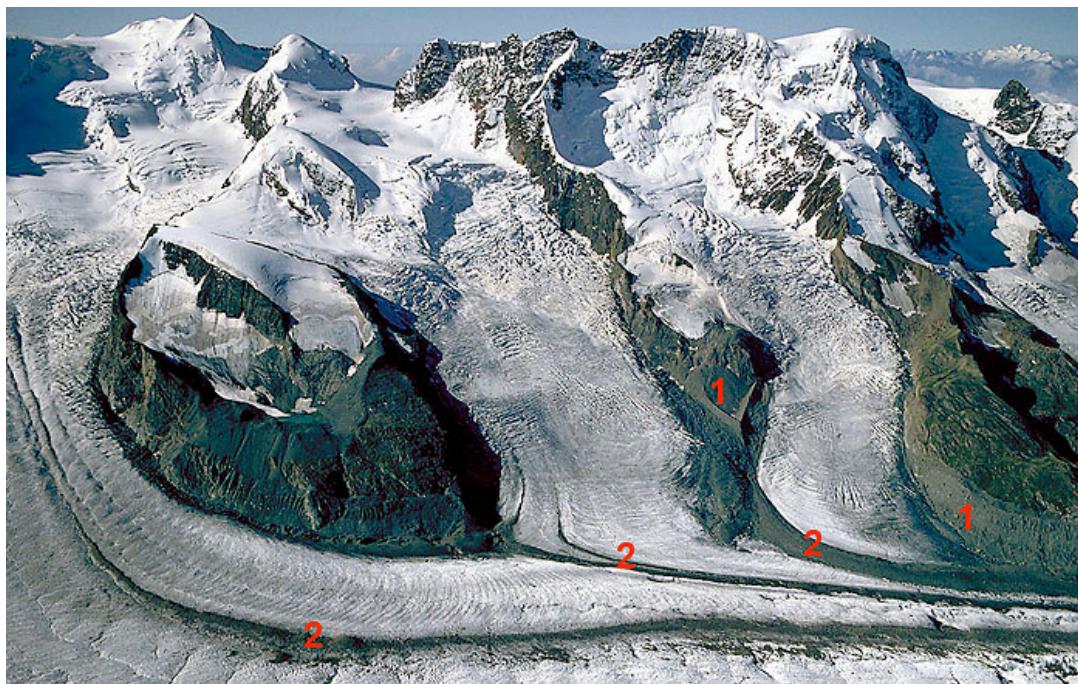


Figura 2: Dos tipos de morrenas formadas en Gornergletscher, Valais, Suiza:

1) morrenas laterales y 2) morrenas centrales.

Último Máximo Glaciar (LGM): se refiere al período climático, anterior a la Pequeña Edad del Hielo, en que las capas de hielo marino y continental cubrieron la máxima superficie registrada. Farber et al. (2005) hace una referencia que durante este período, el máximo avance glaciar ocurrió hace 29ka AP y que persistió en esta situación hasta el inicio de su retroceso hacia 20,5ka AP, según los resultados de una datación directa sobre morrenas de cuatro Quebradas en la Cordillera Blanca (Rurec, Cojup, Llaca y Quesque) utilizando el método de datación radionucleido cosmogénico CRN(10Be). Esta datación se corresponde con la determinada por Clark, P. (2009) que, de forma global, describe que el máximo avance de la superficie glaciar de esta región ocurrió entre 33 y 26.5ka AP en respuesta a la temperatura de la superficie océánica del Pacífico tropical.

AABR: *AreaAltitude Balance Ratio*, es un método estadístico descrito por Osmaston (2005) para reconstruir la altitud de la línea de equilibrio (ELA) de los glaciares. El método relaciona la Altitud y Área (AA) con el Balance Ratio (BR), en base a los intervalos de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal de un glaciar. Para realizar el método, es necesario conocer la superficie de un glaciar y sus intervalos altitudinales para utilizar el método AABR.

REFERENCIAS

Aceituno, P., 1988. On the functioning of the Southem Oscillation in the South American sector. Part 1: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116: 505-524.

Alcalá, J., Palacios, D. and Zamorano, J.J., 2007. La geomorfología glaciar del complejo volcánico Ampato (Arequipa-Perú), VII^a Reunión Nacional de Geomorfología, Michoacán (México), 26-29 de noviembre de 2007.

Ames, A., Muñoz, G., Verástegui, J., Zamora, M. and Zapata, M., 1988. Inventario de Glaciares del Perú. Segunda parte. In: INRENA (Editor). Unidad de Glaciología e Hidrología (UGRH), Huaraz (Perú), pp. 105.

Arguedas, J.M., 1966. *Dioses y hombres de Huarochiri*. Instituto de Estudios Peruanos.

Benn, D.I. et al., 2005. Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and subtropical glaciers. *Quaternary International*, 138-139 (2005): 8-21.

Brückner, E., 1886. Die Hohern Tauern und ihre Eisbedeckung. *Zeitschrift des Deutsch-Österreichische Alpenvereins*, 17: 163-187.

Brückner, E., 1887. Die Höhern der Schneelinie und ihre Bestimmung. *Meteorologische Zeitschrift*, 4: 31-32.

Brückner, E., 1906. Die Höhe der Firmlinie im allgemeinen, *Vierteljahrsschrift d. Naturf. Ges. Zürich*: 50-54.

Burroughs, W., 2003. *Climate: Into the 21st Century*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

Campos, N., 2012. Glacier evolution in the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Perú). Master Thesis, Universidad Complutense de Madrid, (Spain), 55 pp.

Clapperton, C.M., 1983. The glaciation of the Andes. *Quaternary Science Reviews*, 2: 83-155.

Chepstow-Lusty, A., Frogley, M.R., Bauer, B.S., Bush, M.B. and Herrera, A.T., 2003. A late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. *Journal of Quaternary Science*, 18: 491-502.

Dyurgerov, M.B., 2002. *Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis*. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado. Occasional paper, Boulder, 275 pp.

Egas, G. et al., 2010. Inventario de glaciares de la Cordillera Blanca. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. Autoridad Nacional del Agua, Huaraz (Perú), 81 pp.

Francou, B. and Pizarro, L., 1985. El Niño y la Sequia en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia). *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 14(1-2): 1-18.

Francou, B. and Sémiond, H., 1997. Estado de la red de monitoreo existente e impacto de los eventos ENSO sobre el balance de masa de los glaciares en Bolivia y en el Perú. In: R. Galárraga and B. Ibarra (Editors), *Seminario Montañas, Glaciares y Cambios Climáticos*. Escuela Politécnica Nacional. EPN - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. ORSTOM - FUNDACYT, 1997, Quito (Ecuador), pp. 43-51.

García Gutiérrez, E., 2013. Evolución glaciar del cuadrante noroeste del Nevado Coropuna. Master Thesis, Universidad Complutense de Madrid, 50 pp.

Giraldez, C., 2011. Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru). Master Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid (Spain), 125 pp.

Hastenrath, S.L., 1967a. Observations on the Snow Line in the Peruvian Andes. *Journal of Glaciology*, 6: 541-550.

Hastenrath, S.L., 1967b. Rainfall distribution and regime in Central America. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol Ser. B* 15: 201-241.

Hastenrath, S.L., 1985a. *Climate and Circulation of the Tropics*. Reidel, Dordrecht (Holland), 455 pp.

Hastenrath, S.L., 1985b. A review of Pleistocene to Holocene glacier variations in the tropics. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21: 183-194.

IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: R.K. Pachauri and A. Reisinger (Editors), Geneva, Switzerland, pp. 104.

Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D. and Solomina, O., 2008. Recalibration of the yellow Rhizocarpon growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology. *Geomorphology*, 93: 201-212.

Kaser, G. and Osmaston, H., 2002. *Tropical Glaciers*. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge (U.K.), 207 pp.

Klein, A.G. and Isacks, B.L., 1998. Alpine glacial geomorphological studies in the Central Andes using Landsat Thematic Mapper Images. *Glacial Geology and Geomorphology*, 26.

Lichtenecker, N., 1938. Die gegenwärtige und die eiszeitliche Schneegrenze in den Ostalpen, *Verhandl. d., III Intern. Quartär-Konferenz* (1936), Wien (Österreich), pp. 141-147.

Liu, K., Reese, C.A. and Thompson, L.G., 2005. Ice core pollen record of climatic changes in the central Andes during the last 400 years. *Quaternary Research*, 64: 272-278.

Matthes, F., 1939. Report of committee on glaciers. *Transactions American Geophysical Union*, 20: 518-535.

Meierding, T.C., 1982. Late Pleistocene glacial equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: A comparison of methods. *Quaternary Research*, 18: 289-310.

Milankovitch, M.M., 1941. Canon of insolation and the ice-age problem: Königlich Serbische Akademie, Beograd. (English translation by the Israel program for scientific translation, published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation), Washington D.C. (EEUU).

Osmaston, H., 2005. Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area x Altitude, the Area x Altitude Balance Ratio and the Area x Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 22-31: 138-139.

Paredes, M.A. and Espinoza, E.J., 2005. Las relaciones entre la variabilidad de la precipitación en la sierra del Sur del Perú y El Niño/Oscilación del Sur, The El Niño phenomenon and its global impact. Centro International para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIFEN) y European Geosciences Union (EGU), Guayaquil (Ecuador).

Porter, S.C., 1981. Pleistocene glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, 16: 263-292.

Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P. and Grancher, D., 2008. A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16°S) and its implications for climate reconstruction. *Quaternary Research*, 70: 198-212.

Sissons, J.B., 1974. A late glacial Ice Cap in the central Grampians, Scotland. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 62: 95-114.

Sissons, J.B., 1980. The Loch Lomond advance in the Lake District, northern England. *Transactions Royal Society Edinburgh. Earth Sciences*, 71: 13-27.

Solomina, O. et al., 2007. Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change*, 59: 225-235.

Strahler, A.N. and Strahler, A.H., 1989. *Geografía Física*. Editorial Omega, Barcelona, 549 pp.

Thompson, L., 1992. Quelccaya Ice Core Database. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-008. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program. Boulder (EEUU).

Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E. and A., H.K., 2000. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science*, 15 (4): 377-394.

Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E.E., Dansgaard, W. and Grootes, P.M., 1986. The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap. *Science*, 234: 361-364.

Thompson, L.G., Mosley-Thompson, H. and Morales Amao, B., 1984. El Niño-Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, 22: 50-53.

Thompson, L.G. et al., 1995. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science*, 269: 46-50.

Úbeda, J., 2011. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú), Universidad Complutense de Madrid, 558 pp.

Visser, P.C., 1938. *Wissenschaftliche Ergebnisse der Niederländischen Expeditionen in den Karakorum und die angrenzenden Gebiete in den Jahren 1922-1935 II Glaziologie*, Leiden (Netherland), 216 pp.

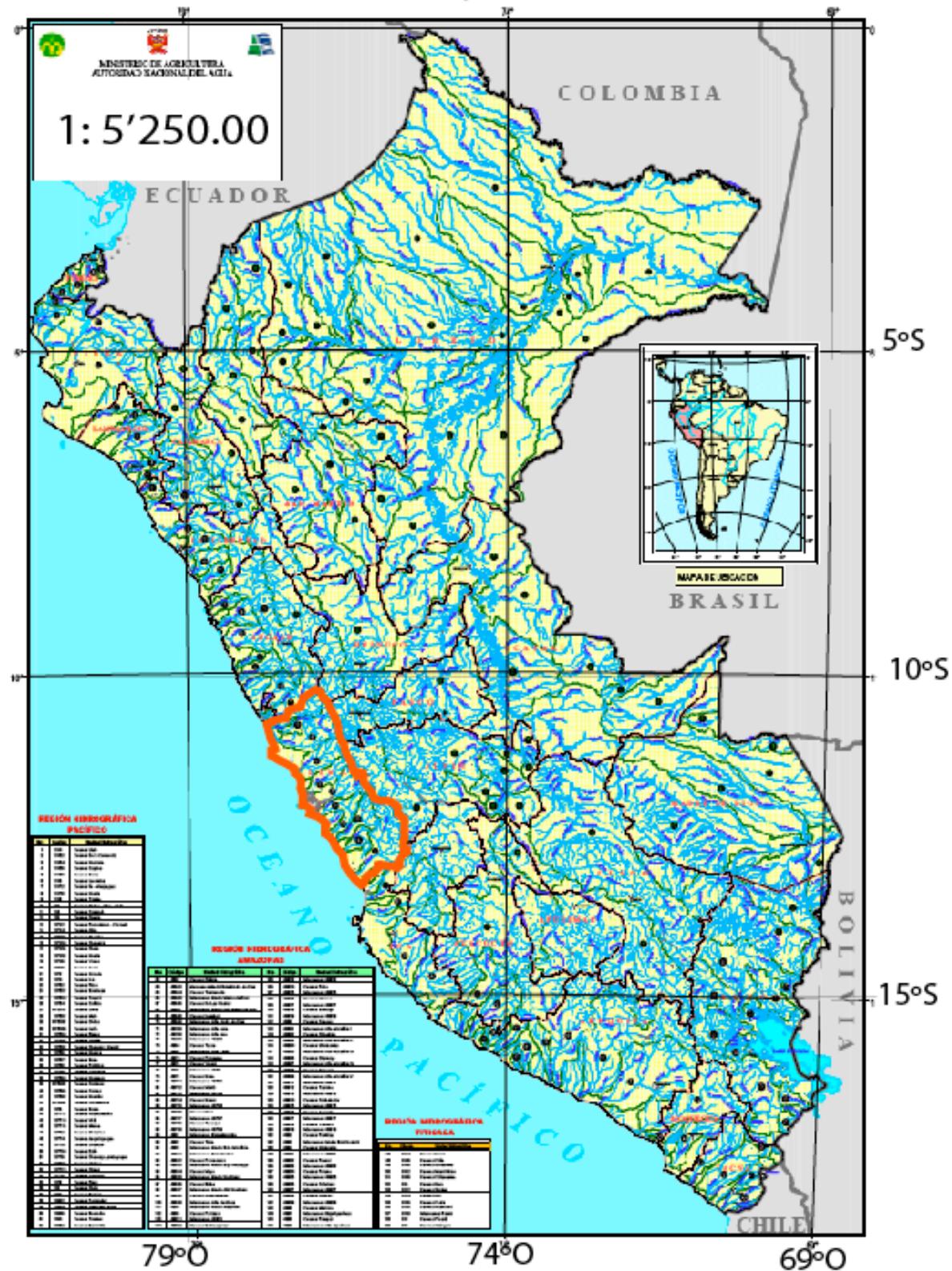
Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M. and Keimig, F.T., 2003. 20th century trends in climate in the tropical Andes. *Climate Change*, 59: 75-99.

Vuille, M. et al., 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89: 79-96.

Zech, R. et al., 2008. Timing of the late Quaternary glaciation in the Andes from ~15° to 40°S. *Journal of Quaternary Science*, 23 (6-7): 635-647.

MAPA HIDROGRÁFICO DEL PERÚ

MINAG y ANA

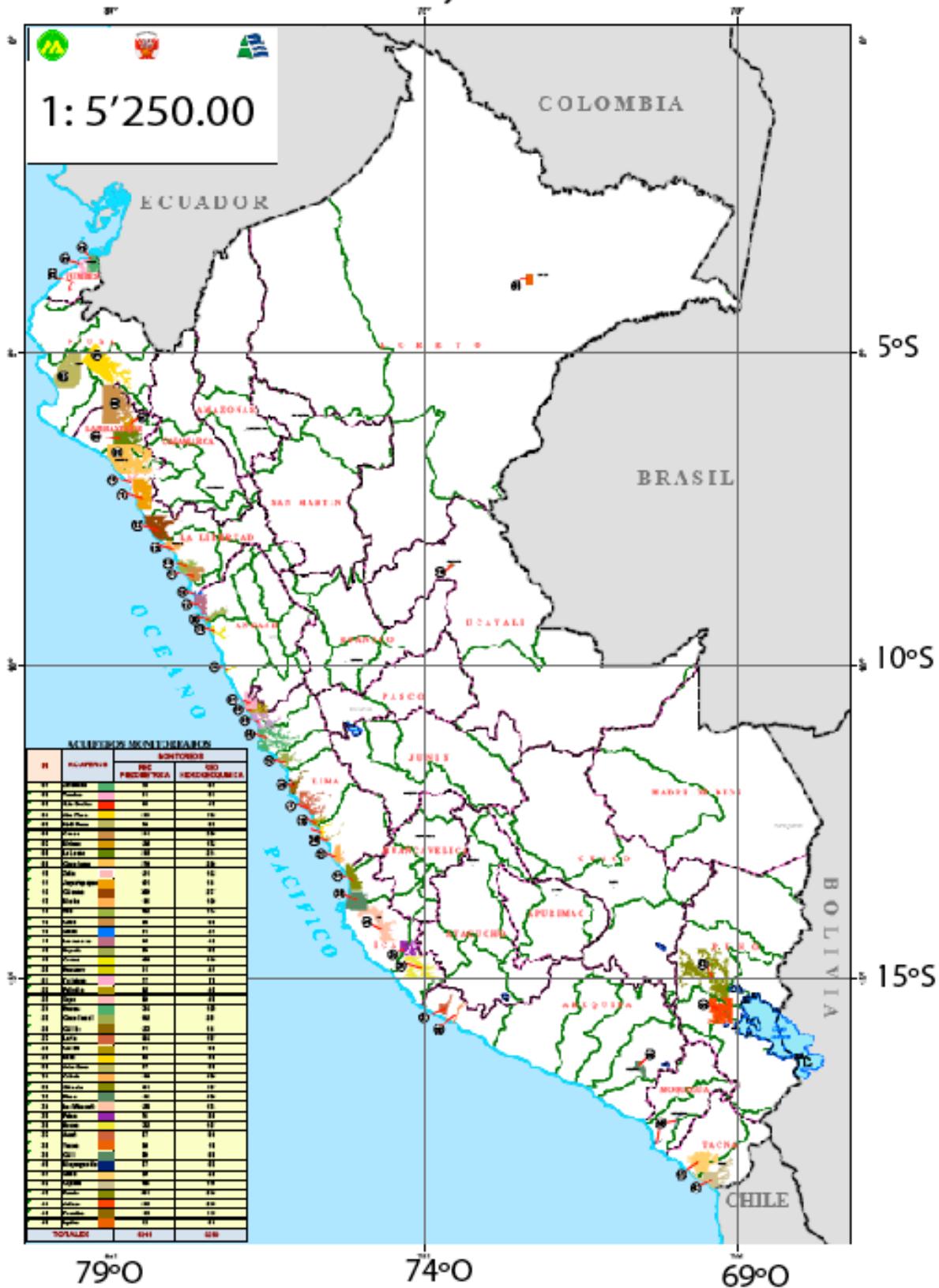


UNIDADES HIDROGRÁFICAS MINAG y ANA



UBICACIÓN DE ACUÍFEROS MONITOREADOS

MINAG y ANA





Enrique Polanco

A las montañas iré;
Sin acordarme de ti.
Y en el mundo no ayaras;
Ni la memoria de mi.

<<El Urpi- Un poema Inca >>
Anónimo