

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“Estimación de la pérdida del área glaciario en la cuenca de la laguna Parón – Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca)”**

Presentada por:

**Sandra Flor Cuadros Díaz**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Lima – Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

**“Estimación de la pérdida del área glaciar en la cuenca de la laguna  
Parón – Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca)”**

Presentada por:

**Sandra Flor Cuadros Díaz**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia  
PRESIDENTE

---

Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Quispe  
MIEMBRO

---

Ing. Franklin Unsihuay Tovar  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Armando Aramayo Bazzetti  
ASESOR

---

Dr. José Úbeda Palenque  
CO-ASESOR

## **DEDICATORIA**

A mis padres, quienes me apoyan mis decisiones. A mis maestros, a mis amigos. A todos los que apoyaron este largo proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a mis asesores y todos los colaboradores que hicieron posible este trabajo. También agradecer a mis profesores quienes colaboraron activamente a que este trabajo sea sustentado.

## ÍNDICE GENERAL

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
<b>2.1.</b>	<b>Glaciares: características y conceptos generales</b> .....	3
<b>2.2.</b>	<b>Balance de masa de un glaciar</b> .....	4
<b>2.3.</b>	<b>Cálculo de la ELA</b> .....	6
<b>2.4.</b>	<b>Glaciares de los Andes tropicales y su importancia</b> .....	7
<b>2.5.</b>	<b>Geo indicadores</b> .....	9
<b>2.6.</b>	<b>Fases glaciares y PEH</b> .....	9
<b>2.7.</b>	<b>Cambio climático actual</b> .....	10
<b>2.8.</b>	<b>Impactos del cambio climático en los glaciares tropicales</b> .....	11
<b>2.9.</b>	<b>Parque Nacional Huascarán</b> .....	13
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	15
<b>3.1.</b>	<b>Materiales</b> .....	15
<b>3.2.</b>	<b>Procedimiento</b> .....	15
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	20
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	35
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	36
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Resumen del total de glaciares evaluados para el año 2014 y 1962 .....	31
Tabla 2:	Tasas de desglaciación en función a la reducción del área y elevación de la ELA para el período estudiado .....	34
Tabla 3:	Tasas de desglaciación en función a la reducción del área y elevación de la ELA para escenarios futuros .....	35
Tabla 4:	ELA y área glaciár según los tres escenarios futuros propuestos .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Los subsistemas de acumulación y ablación divididos por la Línea de Equilibrio .....	14
Figura 2: Imagen de los glaciares de la cuenca Parón para el año 1962 .....	29
Figura 3: Imagen de los glaciares de la cuenca Parón para el año 2014 .....	30
Figura 4: Precipitación, Temperatura máxima, mínima y promedio de la región estudiada (Áncash) para los años 1981-2013 .....	34

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1:	Cálculo de la ELA actual (2014) .....	59
ANEXO 2:	Cálculo de la ELA para el año 1962 .....	62
ANEXO 3:	Área de estudio .....	64
ANEXO 4:	Modelo de elevación digital de la cuenca Parón .....	65
ANEXO 5:	Cálculo de la ELA de cada glaciar .....	66
ANEXO 6:	Fotografías del área de estudio .....	67



## RESUMEN

El cambio climático está causando el retroceso acelerado de glaciares. En la Cordillera Blanca se encuentra el 70 por ciento de los glaciares tropicales del mundo. El impacto del cambio climático en estos glaciares tiene fuertes repercusiones en sistemas económicos, sociales y ecológicos debido a la elevada cantidad de población que se encuentra asentada en sus valles. Se estimó la desaparición de los glaciares en la cuenca de Parón en base a la reducción del área y la elevación de la ELA (Equilibrium Line Altitude) mediante el método AABR desde el año 1962 hasta la actualidad y se pronosticaron tres escenarios futuros. Todos los escenarios se basan en la reducción del área glaciaria y elevación de la ELA con diferentes tasas, siendo el escenario 3 el más alarmante donde la mitad del área glaciaria que actualmente existe desaparecería. El Parque Nacional Huascarán deberá tomar medidas de adaptación en función al peor de los escenarios como prevención para evitar pérdidas económicas y humanas, considerando la escasez del recurso hídrico.

**Palabras clave:** *Parque Nacional Huascarán, Huaraz, glaciares, cambio climático, evolución glaciaria.*

## ABSTRACT

Climate change is causing an accelerated decline in glaciers. In the Cordillera Blanca encompasses 70 percent of the world's tropical glaciers. The impact of climate change on these glaciers has a strong impact on economic, social and ecological systems due to the high number of population that is settled in the valleys. The disappearance of glaciers in Paron basin was estimated based using the area reduction and elevation of the ELA (Equilibrium Line Altitude) with the AABR method from 1962 to the present, and three future scenarios predicted. All scenarios are based on the reduction of glacier area and elevation of the ELA with different rates, being the most alarming scenario 3 where half of the glacier area that currently exists would disappear. Huascarán National Park should take adaptation measures according to the worst scenario as prevention to avoid human and economic losses, considering the scarcity of water resources.

**Keywords:** *Huascarán National Park, Huaraz, glaciares, cambio climático, evolución glacial.*

## I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de glaciares del mundo se encuentran actualmente en un proceso de reducción de su superficie glaciaria; salvo unos casos, como, por ejemplo, al suroeste de la Cordillera Darwin en Tierra de Fuego (Koch, 2015) o el Karakoram en el Himalaya, donde el avance glaciario se explica por variaciones del clima zonal como el incremento de las precipitaciones (Kaltenborn *et al.*, 2010). La principal razón de este retroceso es atribuida al actual incremento de las temperaturas globales consecuencia del cambio climático que en la actualidad acontece (Mark *et al.*, 2010).

Los glaciares tropicales son particularmente vulnerables a estos cambios de las condiciones atmosféricas-terrestres como por ejemplo variaciones en la temperatura del aire, precipitaciones, humedad, nubosidad, ya que, por encontrarse en los trópicos, la ablación ocurre durante todo el año (Vuille *et al.*, 2008). Por este motivo, son un excelente indicador de los procesos climáticos (Francou, 2015).

El 70 por ciento de los glaciares tropicales se encuentran en Perú (WWF, 2015; MINAM, 2014), muchos de ellos concentrados en la Cordillera Blanca. Estos glaciares son además un gran reservorio del recurso hídrico que abastece a la cuenca del Pacífico, que a pesar de ser una de las regiones más áridas de la Tierra, concentra la mayor cantidad de población en Perú.

Además de su importancia como reserva de agua para consumo humano directo, los glaciares son también la fuente de agua para alimentar hidroeléctricas que representan la segunda fuente de energía eléctrica del país. Más aún, el agua proveniente de los glaciares mediante la escorrentía es la principal fuente de agua de la que dependen ecosistemas alto andinos como los bofedales o bosques de *polylepis* (TUNUPA, 2010), cuya importancia como reguladores de ciclos ambientales es fundamental, además de formar parte de la biodiversidad que el país posee. Los glaciares, además, proveen un escenario para la práctica de deportes extremos, los cuales son un atractivo para el turismo de aventura en alta montaña.

Finalmente, el retroceso de glaciares y la consecuente formación de lagunas glaciares en la parte alta de la cuenca tienen implicancias en relación al riesgo que sufrirían las poblaciones en las partes medias y bajas del valle por aludes y avalanchas, como ya ha sucedido antes en el Callejón de Huaylas.

Por todo lo anterior, el retroceso de glaciares como consecuencia al cambio climático debería ser considerado en las políticas de estado, gestión del territorio y los recursos naturales, tanto a nivel nacional como regional, ya que esta disminución del recurso hídrico tendrá repercusiones no solo ambientales sino también socio económicas en la población a corto y largo plazo. Aunque en la actualidad, la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (UGRH-ANA) monitorea anualmente algunos glaciares con la finalidad de tener un registro sobre su estado, sin embargo, este trabajo tiene sus limitaciones. El método propuesto en el presente trabajo es un método que puede complementar o servir como alternativa cuando los costos y la logística de realizar el monitoreo in situ no sean posibles. Como tal, los objetivos de la presente investigación buscan: 1) evaluar el retroceso glaciar reciente de la cuenca de la laguna Parón mediante la variación en las altitudes de las líneas de equilibrio (ELA) deducidas de la geomorfología de los glaciares, 2) evaluar el retroceso glaciar reciente de la cuenca de la laguna Parón mediante la variación de las superficies glaciares (áreas) para dos períodos, 3) usar dichos resultados para extrapolarlos y pronosticar su evolución durante las próximas décadas y 4) proponer medidas de adaptación al retroceso glaciar.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Glaciares: características y conceptos generales

La Criósfera representa a todas las formas de hielo que en forma natural existen en el planeta, una de las cuales son los glaciares (Ferrando, 2014). Aunque el término es utilizado en múltiples ocasiones y en distintos contextos, definir claramente a un “glaciar” resulta complejo por las diferentes formas que ellos adoptan y en los diferentes escenarios climáticos y geográficos en los cuales ocurren. Por este motivo, existen diversas definiciones en torno a este.

Una definición es la propuesta por Huddard y Stott en el 2010: “Los glaciares se constituyen por cristales de hielo, nieve, aire, agua y derrubios de rocas”. Tarbuck y Lutgens (2005) definen a los glaciares como “una gruesa masa de hielo que se origina sobre la superficie terrestre a partir de la acumulación, compactación y recristalización de la nieve”.

De acuerdo al *Global Terrestrial Observing System* de la FAO, un glaciar se define como “una masa de hielo en la superficie terrestre, que fluye pendiente abajo (por deformación interna y por deslizamiento en la base), y restringida por la topografía del entorno (por ejemplo las laderas de un valle o las cumbres que lo rodean); la topografía del lecho es la mayor influencia en la dinámica y pendiente de la superficie de un glaciar. El glaciar se mantiene por la acumulación de nieve en las cotas altas, balanceada por la fusión a cotas bajas o por la descarga al mar” (IPCC, 2001). Finalmente, según el PNUMA, un glaciar es una “masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo por efecto de la gravedad (mediante deformación interna y/o

deslizamiento de su base), constreñida por el esfuerzo interno y por el rozamiento en su base y en sus lados”.

Para efectos del presente trabajo, esta última definición será utilizada, pues provee el criterio para la diferenciación de los glaciares especialmente al momento de la delimitación de los mismos.

## **2.2. Balance de masa de un glaciar**

De acuerdo a Huddart y Stott, el “estado de salud de un glaciar” se puede conocer a través de su balance de masa. El balance de masa de un glaciar indica si ha habido un incremento, una reducción o si el glaciar se encuentra en estado de equilibrio (Knight, 1999; Huddart y Stott, 2010; *Benn et al.*, 2000).

Los factores que influyen en la variación del balance de masa pueden ser de dos tipos; climáticos o mecánicos. Los factores climáticos hacen referencia principalmente a la temperatura y precipitación, mientras que los factores mecánicos incluyen las avalanchas y desprendimientos de bloques glaciares, los cuales redistribuyen la masa de hielo dentro del mismo glaciar. De estos dos, se considera que el clima es el principal contribuyente (Knight, 1999; Huddart y Stott, 2010).

En el balance de masa glaciar se reconocen dos principales áreas: zona de acumulación y zona de ablación. En la zona de acumulación predominan los procesos de ganancia de masa, los cuales son la precipitación de nieve, de granizo, el congelamiento del agua líquida y la nieve que se ha acumulado como resultado de las avalanchas (Knight, 1999; Huddart y Stott, 2010). Por otro lado, en la zona de ablación predominan los procesos de pérdida de masa, siendo estos principalmente el derretimiento, la sublimación, la erosión del viento y avalanchas. De todos los agentes implicados en la ablación glaciar el derretimiento viene a ser el más importante, y este ocurre cuando

el hielo y la nieve se encuentran sometidos al calor suministrado primordialmente por la radiación o por el intercambio de calor con el aire (Knight, 1999).

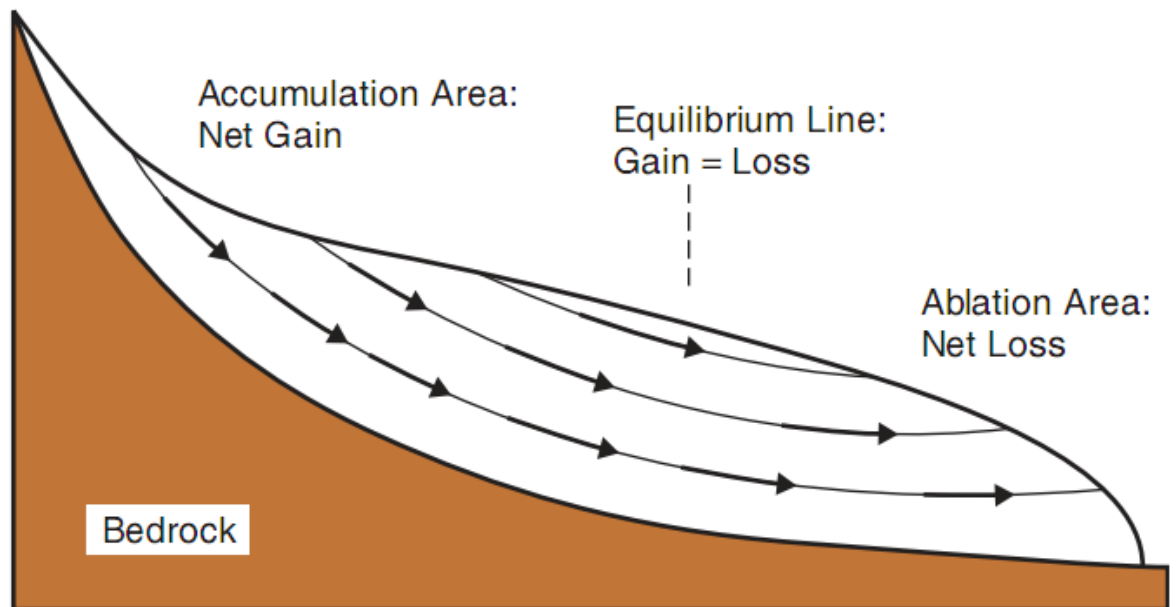


Figura 1: Los subsistemas de acumulación y ablación divididos por la Línea de Equilibrio (Huddart y Stott, 2010)

La supervivencia de un glaciar en el tiempo se encuentra en función de la acumulación y la ablación, los cuales se pueden identificar como subsistemas del sistema glaciar. La línea conceptual que separa ambos sub sistemas se denomina línea de equilibrio *Equilibrium line*”, y la altitud a la que se encuentre esta línea se le denomina *Equilibrium Line Altitude* (ELA). La ELA por lo tanto es la altura promedio anual en la cual el balance de masa se iguala a cero (Úbeda, 2010; Benn y Lehmkuhl, 2000; Huddart y Stott, 2010). Si a lo largo de un año, los procesos de acumulación predominan sobre la ablación, la ganancia de masa se verá favorecida y por lo tanto también la expansión glaciar. Por este motivo la ELA se moverá pendiente abajo. Lo opuesto ocurre cuando los procesos de ablación predominan sobre la acumulación, en cuyo caso la ELA se moverá pendiente arriba. Si esta tendencia se mantiene, de tal forma que la ELA se encuentre por encima de la cumbre de la montaña (Ver Figura 1), el glaciar está condenado a desaparecer, pues significaría que los procesos de acumulación ocurren a una altura por encima de la altura de la montaña (Úbeda, 2010; Huddart y Stott, 2010).

El concepto de ELA es un concepto teórico, y que puede referirse a diferentes escalas en el espacio y en el tiempo. La ELA entonces puede referirse a la ELA de un glaciar en particular, de un conjunto de glaciares, de una montaña, de un valle, y también se puede expresar para un mes, un año, o para una escala de miles de años. El cálculo de la ELA es de bastante importancia pues su monitoreo en el tiempo nos indica el estado del glaciar y su evolución, y por lo tanto sus respectivas consecuencias.

### 2.3. Cálculo de la ELA

Existen diferentes métodos para calcular la ELA de un glaciar o un conjunto de glaciares; esta puede ser la ELA de monitoreo ( $ELA_m$ ), estimada a partir del monitoreo in situ de un glaciar y la ELA geomorfológica ( $ELA_g$ ), deducida de la geomorfología del glaciar, y motivo de la presente tesis de investigación ya que el método presenta una alternativa interesante para las áreas donde el monitoreo in situ no sea viable (Leonard y Fountain, 2003).

#### a. $ELA_m$

La ELA de monitoreo ( $ELA_m$ ) se calcula con datos obtenidos de campo. Para esto, se deben colocar estacas a lo largo del glaciar, tratando de cubrir la mayor cantidad de área del cual se quiere calcular la ELA. Las estacas deben estar espaciadas para cubrir todas las regiones altitudinales del glaciar, cubriendo una distancia en elevación cada 50 metros. Estas estacas deben ser colocadas al final del año hidrológico del área de estudio, y se deben dejar ahí por un año. Al finalizar el período, se obtienen datos de acumulación o ablación en metros equivalentes de agua. Con los datos de las estacas y las respectivas altitudes, se realiza una extrapolación a toda el área glaciar. Finalmente, se calcula la ELA, que es la línea en la cual la acumulación iguala a la ablación (Rabatel *et al.*, 2013, Wu *et al.*, 2014).

#### b. $ELA_g$

Para el cálculo de la ELA geomorfológica se han desarrollado diversas metodologías. De estas, la más precisa es la Area x Altitude Balance Ratio (AABR). Esta metodología desarrollada por Osmaston se basa en el principio que



las pérdidas o ganancias de masa cerca de la ELA son menores que las que ocurren lejanas a esta. Además, se utilizan distintos valores de Balance Ratio (BR), para ajustar la pendiente del glaciar. Al estimar la ELA de un conjunto de glaciares, se elige el valor de BR cuya desviación estándar sea la menor (Osmaston, 2005).

#### **2.4. Glaciares de los Andes tropicales y su importancia**

Se denomina glaciares tropicales a aquellos glaciares cuya localización se encuentra comprendida entre los trópicos astronómicos, en un área en el que la variación de la temperatura entre el día y la noche sea más marcada que la variación anual, que se encuentre dentro de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y que se encuentran en áreas donde existen entre uno y dos regímenes de lluvias anualmente (“outer tropics) o humedad constante durante todo el año (“inner tropics”) (Kaser y Georges, 1999; Kaser y Osmaston, 2002).

Más del 99 por ciento de los glaciares tropicales del mundo se encuentran en la Cordillera de los Andes en América del Sur. Específicamente, Perú alberga más del 71 por ciento de estos glaciares (Kaser y Osmaston, 2002; WWF, 2015), encontrándose la mayor parte en la Cordillera Blanca (Kaser y Georges, 1999; Rabatel *et al.*, 2013; Bury *et al.*, 2011).

A pesar de ser pequeños en volumen, a comparación de glaciares de las latitudes medias y altas, los glaciares tropicales son importantes por dos razones principalmente; la primera es que son excelentes indicadores de variabilidad climática, la segunda es que cumplen un rol fundamental en el ciclo hidrológico y como reservorios del recurso hídrico para consumo, irrigación y generación de energía (Coudrain *et al.*, 2005).

En los Andes, muchas ciudades y centros poblados se encuentran por encima de los 2500 msnm, y por lo tanto, dependen en gran medida de glaciares y lagunas glaciares como su principal fuente de agua, especialmente durante la época seca. En Quito, gran

parte del consumo de agua proviene del glaciar del Volcán Antizana, el cual está rápidamente retrocediendo. En La Paz, Bolivia, el 15 por ciento del agua consumida por la población viene directamente de glaciares (Bradley *et al.*, 2006). En muchos valles inter andinos, la agricultura depende directamente de la escorrentía glaciar (Brown, 2013). En Perú, 40 por ciento de la descarga hídrica al Río Santa durante la época seca proviene del derretimiento de glaciares de la Cordillera Blanca, la cual no es renovada por el aporte anual de precipitación (Bradley *et al.*, 2006).

Por lo tanto, el suministro de agua que proviene de los glaciares alivia la diferencia estacional que persiste en los trópicos, dividida en una temporada húmeda y seca, al ser la época seca el período de mayor escurrimiento de agua proveniente del glaciar (Painter, 2007).

Además, el aporte de los glaciares para el suministro de agua en Perú es especialmente importante en la vertiente del Pacífico, ya que estos constituyen su principal fuente de agua (Vuille *et al.*, 2008). El 98 por ciento del agua del país se encuentra en la vertiente oriental de los Andes (cuena del Atlántico), donde la densidad poblacional es baja y la agricultura es una actividad marginal. Por el contrario, la vertiente occidental (cuena del Pacífico) concentra la mayor cantidad de población y actividades económicas. Paradójicamente, el flanco occidental de la cordillera es una región seca; 2 por ciento del agua dulce nacional disponible (Vergara *et al.*, 2007); incrementando la dependencia de ésta sobre los glaciares.

Más allá de la importancia de los glaciares para consumo humano, el agua proveniente de los glaciares asegura la subsistencia de diversos ecosistemas, así como de actividades agropecuarias e industriales (Coudrain, 2005).

## **2.5. Geo indicadores**

De acuerdo a la International Union of Geological Sciences IUGS, se le llama geo indicadores a aquellos parámetros geológicos que pueden ser medidos y por lo tanto monitoreados para evaluar cambios sobre el medio ambiente en el que se encuentran (IUGS, 2002).

Al igual que los indicadores biológicos de variables ambientales, los geo indicadores tienen la capacidad de responder a cambios y por lo tanto permiten la interpretación de estos. La IUGS compiló una lista de geo indicadores, entre los cuales se encuentra las fluctuaciones glaciares (IUGS, 2002).

Las fluctuaciones de los glaciares, medidas mediante el balance de masa o longitud del glaciar en el tiempo dan información de la evolución de estos, y debido a que estos responden a la variación climática, son denominados geo indicadores de cambio climático.

## **2.6. Fases glaciares y PEH**

El clima de la historia de la tierra ha variado constantemente, entre periodos de glaciaciones e inter glaciaciones. Durante el Cuaternario, por ejemplo, ocurrieron al menos cuatro grandes Glaciaciones, denominadas Nebraskan, Kansan, Illinoian y Wisconsin. Durante estas glaciaciones, la expansión de grandes masas de hielo fue posible, las cuales quedan registradas geomorfológicamente a manera de morrenas (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Posterior a estas glaciaciones, durante el Holoceno, la temperatura de la Tierra ha mantenido un óptimo climático más cálido en promedio, el cual ha permitido la expansión de la humanidad. Sin embargo, durante el Holoceno ocurrió una anomalía

del óptimo climático llamado Little Ice Age (LIA) o Pequeña Edad de Hielo (PEH) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Este fue un periodo frío que se desarrolló durante los siglos XVI y XVIII en todo el mundo y que se caracterizó por un descenso de las temperaturas (Úbeda *et al.*, 2014). Aunque esas fases han sido bien documentados para el Hemisferio Norte todavía permanecen insuficientemente estudiadas en las zonas tropicales (Rabatel *et al.*, 2013; Grove, 1988).

Las pulsaciones de los avances glaciares quedan registradas a manera de morrenas. Sin embargo, para conocer la edad de los avances glaciares es preciso establecer la cronología de los eventos es necesario realizar dataciones. De esta manera se puede atribuir cada morrena a un evento de avance glaciar, incluido el de la Pequeña Edad del Hielo.

## **2.7. Cambio climático actual**

De acuerdo a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), el cambio climático es un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Este cambio altera los sistemas terrestres en todas sus dimensiones, incluida la biósfera, la hidrósfera, la atmósfera, entre otros. Además de impactar a los organismos vivos, los cuales han sido el centro de atención de muchas investigaciones en las últimas décadas, también tiene impactos sobre la superficie terrestre, incluidos los glaciares.

El 5° Informe de Evaluación del IPCC (2013) refiere que el retroceso glaciar es un hecho prácticamente global a causa del incremento de la temperatura; además, las regiones que han tenido las mayores tasas de reducción son: el oeste canadiense y norte americano, Europa central y en las latitudes bajas. En estas regiones más de 600 glaciares han desaparecido en las últimas décadas. Mientras que los glaciares que aún persisten han sufrido una disminución de su área y volumen.

## **2.8. Impactos del cambio climático en los glaciares tropicales**

Los glaciares del mundo se encuentran en retroceso desde el final de la Pequeña Edad de Hielo, alrededor del año 1850 (Fernández, 2014). Sin embargo, en décadas recientes este proceso se está acelerando a un ritmo sin precedentes, consecuencia del cambio climático que experimenta el sistema terrestre actualmente, especialmente aquellos que se encuentran en latitudes tropicales. De acuerdo a predicciones del IPCC en su informe del año 2014, las temperaturas a fin del siglo 21 subirán al menos entre 1°C y 2°C. Este informe indica también que aumentos de la temperatura de 4°C podrían causar la desaparición de casi todos los glaciares de la tierra (IPCC, 2014).

Aunque los glaciares de todo el mundo están retrocediendo, en los Andes Tropicales la ocurrencia de este retroceso, además, coincide con la escasez del recurso hídrico así como de elevadas densidades poblacionales (Bradley *et al.*, 2006), creando una necesidad urgente de generar conciencia y fortalecer la gestión del recurso.

La pérdida de masa glaciar, y por lo tanto también una reducción del volumen de agua de escorrentía, tiene impacto en ecosistemas alto andinos como por ejemplo los páramos y bosques nublados (Bury *et al.*, 2013; Poveda y Pineda, 2009). En muchos pueblos y ciudades de los Andes, como por ejemplo Bogotá, los páramos proveen una fuente de agua potable (Poveda y Pineda, 2009). Además, los bofedales alto andinos que no sean suministrados por un flujo continuo de agua se encuentran en riesgo de fragmentación con una consecuente pérdida de la biodiversidad, lo cual ya ha sido

observado en el valle de Quilcayhuanca, en Perú (Bury *et al.*, 2013). Adicionalmente, estudios realizados en los Andes de Ecuador por Jacobsen *et al.* (2012) estimaron que el 11 por ciento de especies de la región y endémicas podrían desaparecer si los glaciares también desaparecen, así como una pérdida de riqueza de especies en la zona baja de la cuenca. Otro estudio realizado por Jay Malcolm (2006) predijo que 43 por ciento de las especies endémicas de la región podrían desaparecer como consecuencia del cambio climático. Finalmente, el retroceso de glaciares también modifica los patrones de vegetación, por ejemplo, elevando la línea de bosque con lo cual algunas especies podrían ampliar su rango de distribución, sin embargo, otras también podrían perjudicarse por competencia y/o pérdida de hábitat (Gutiérrez y Trejo, 2014; Sánchez *et al.*, 2011).

Además de su impacto en los ecosistemas, el retroceso glaciar tiene también implicancias en relación a la oferta para la industria hidroeléctrica, la cual disminuiría su eficiencia por menor descarga hídrica. En Colombia la capacidad instalada de energía pertenece a hidroeléctricas en un 71 por ciento, 49 por ciento en Ecuador, 32 por ciento en Bolivia y 56 por ciento en Perú (UNEP, 2013), con lo cual representan una actividad importante para la economía. Un estudio realizado por Vergara *et al.* (2007) en el Cañón del Pato, en el Río Santa en Perú concluyó una reducción del 50 por ciento de esorrentía de glaciares resultaría en una disminución del poder energético anual de aproximadamente 20 por ciento. Esto tendría implicancias económicas pues será necesario cambiar gran parte de la matriz energética de estos países, lo cual puede resultar poco práctico o económicamente inviable (Bradley *et al.*, 2006).

Otro problema relacionado al retroceso glaciar es la formación de lagunas glaciares. En la quebrada Parón, en la Cordillera Blanca, Huaraz, el retroceso del glaciar Artesonraju en los últimos cuarenta años; reportado en 0.6 metros de agua equivalente por año; por Rabatel *et al.* (2013), equivalente a una pérdida de masa glaciar del 30 por ciento, ha resultado en la formación de una nueva laguna glaciar, la cual está rodeada por bloques de hielo y roca suelta, lo cual la hacen un área vulnerable a

deslizamientos. Esta laguna se encuentra por encima de dos lagunas ya formadas, incluida la laguna Parón, la más grande de la Cordillera Blanca. Esto lo convierte en una amenaza en caso de ocurrir deslizamientos o avalanchas consecuencia de mayor derretimiento del hielo adyacente (Chisolm *et al.*, 2012).

Además de esto, el retroceso de glaciares también tiene un impacto sobre el turismo de media y alta montaña, así como en el valor paisajístico que proveen. Esto se refleja en el glaciar Pastoruri, el cual en los años 1990 fue bastante visitado como atractivo turístico por turismo tanto nacional como extranjero. Sin embargo, en la actualidad la pérdida de masa glaciar ha disminuido su valor paisajístico, reduciendo la cantidad de visitantes recibidos considerablemente lo cual repercute en los ingresos económicos del Parque Nacional Huascarán (J. Gómez, com. pers.).

## **2.9. Parque Nacional Huascarán**

El Parque Nacional Huascarán fue creado el año 1975. El objeto de creación de este es proteger una muestra representativa de los ecosistemas de alta montaña, incluyendo la cordillera tropical más extensa del mundo (SERNANP, 2010). Dos años después, en Marzo de 1977 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura – UNESCO reconoce el Parque Nacional Huascarán y su entorno como Reserva de Biósfera por poseer características especiales en tanto lo biológico y paisajístico como lo social y cultural (SERNANP, 2010).

Dentro del Parque Nacional Huascarán existen al menos 9 zonas de vida, y 2 más en su zona de amortiguamiento del total de 85 que existen en el mundo. Además, dentro del Parque existen al menos unas especies de plantas y al menos 241 especies de animales, solo incluyendo vertebrados. Además, en lo que respecta a aves, ha sido considerada por BirdLife International como una zona de importancia para las aves (Important Bird Area) IBA (SERNANP, 2010). Dentro de la zona se encuentran algunas especies endémicas para Perú como la Cotinga de mejilla blanca (*Zaratornis*

*stresemanni*), el Tapaculo de Ancash (*Scytalopus affinis*), en colibrí Cometa de vientre gris (*Taphrolesbia griseiventris*), entre otros.

Sin embargo, el Parque además presenta algunas amenazas a la biodiversidad. Entre estas destacan la tala de especies vegetales, el cambio de uso de suelo para ganadería, infraestructura, represas, entre otras, la quema de pastos y bosques, y el cambio climático (SERNANP, 2010). Por todo esto, requiere estrategias que logren un desarrollo sostenible para el área sin afectar los objetivos de conservación de la misma.



### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Materiales**

- Google Earth versión 7
- Materiales de escritorio
- Hoja de cálculo en Excel de Osmaston (2005)
- Cámara fotográfica
- Curvas de nivel del área de estudio
- Imágenes satelitales y fotografías aéreas
- Software ArcGis 10.2

#### **3.2. Procedimiento**

La investigación se trabajó en tres distintas etapas.

##### **3.2.1. Recopilación de información secundaria**

En esta etapa se recopiló información secundaria relevante para realizar el presente estudio (publicaciones relacionadas al área de estudio, bases de datos de SENAMHI, fotografías aéreas del área de estudio, imágenes satelitales, y la topografía digital).

Toda esta información adquirida, se integró en una base de datos general, y en un sistema de información geográfica GIS.

### 3.2.2. Fase de campo

Para esta fase, se realizó una campaña de campo de 25 días, con el objetivo de hacer un reconocimiento geomorfológico del área de estudio. Además, se hizo también un registro de fotografías y videos de los glaciares que permita mejorar el proceso de identificación de la cuenca.

### 3.2.3. Post campo

#### a. Delimitación y medición de la superficie de los glaciares.

Para la delimitación de los glaciares en el año 2014 se procedió a la utilización del software Google Earth versión 7. En este, se utilizó la herramienta “Agregar Polígono”, y con este se delimitó las superficies glaciares. Para delimitar el glaciar, se utilizó un criterio geomorfológico, de tal forma que cada unidad se separa de otra por grietas, además de lenguas glaciares.

El mismo procedimiento se utilizó para los glaciares del año 1962. Sin embargo, al no tener una imagen con buena resolución en Google Earth para los glaciares de esta fecha, se procedió a comparar la imagen con fotografías aéreas.

Posteriormente desde ArcGis los polígonos digitalizados fueron importados y convertidos en formato SHP con la herramienta (Arc Toolbox – From KML – KML to Layer). De esta manera los glaciares delimitados en Google Earth ahora se encuentran en ArcGis y están listos para ser procesados.

#### b. Estimación de la altitud de la línea de equilibrio (ELAs) de los glaciares para el año 2014 y el año 1962.

Primero, se generaron bandas altitudinales para los glaciares. Para esto fueron necesarias dos capas de información: **1)** las curvas de nivel (se utilizaron curvas cada 50 m) y **2)** los glaciares delimitados y digitalizados (obtenidos del paso anterior).

Ambas capas de información se cargaron en ArcGis, luego se seleccionaron ambas y se activó la edición de “*Glaciares Actuales*”. Posteriormente se seleccionó la herramienta (*More Editing Tools - Topology*) y se procedió a realizar un corte utilizando (*Split polygons*). Esta acción hizo que un glaciar seleccionado se fraccione en tantas bandas altitudinales como curvas de nivel tenga.

Una vez individualizados los glaciares con sus respectivas bandas altitudinales, se procedió a generar una tabla de atributos con los siguientes campos:

- **Código**
- **Altitud Mayor**
- **Altitud Menor**
- **Altitud Media**
- **Área**

Posteriormente, con estos datos se aplicó el método “*Area x Altitude*” (AA) el cual incluye una hoja de cálculos pre programados en Excel en el que se calculó la ELA con la siguiente ecuación:

$$ELA = \Sigma (Z*A)/\Sigma A$$

**Donde:**

$\Sigma (Z*A)$ : *sumatoria del producto de la altitud media de cada banda altitudinal por su área.*

$\Sigma A$ : *sumatoria de las áreas de todas las bandas altitudinales.*

La hoja de cálculo está pre programada para calcular la ELA con diferentes valores de BR (balance ratio). Para cada glaciar, se ingresaron diferentes valores de BR, que de acuerdo a Osmaston (2005) en su propuesta teórica son: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 y 3,0. Para cada valor de **BR** que se ingresó al sistema, automáticamente este calculó un valor distinto de la ELA.

En la hoja de cálculo también se estimó el promedio de las diferentes ELAS y las desviaciones estándar de los conjuntos de datos. Finalmente, se eligió el valor de BR con el que se obtuvo el menor valor de desviación estándar por considerar que era el valor más probable (Osmaston, 2005) para el conjunto de glaciares.

c. Cálculo de las tasas de desglaciación entre las fechas escogidas, en función de la variación observada en superficies ( $\text{km}^2/\text{año}$ ) y ELAs ( $\text{m}/\text{año}$ ).

Con los datos obtenidos de área glaciar y ELA de ambos años, se calculó el retroceso de área glaciar y de la ELA para el período estudiado con las siguientes fórmulas:

$$T_{ds} = \Delta S / R$$

$$T_{d_{ELA}} = \Delta ELA / R$$

Donde

$T_{ds}$ : la tasa de desglaciación ( $\text{km}^2/\text{año}$ )

$T_{d_{ELA}}$ : la tasa de desglaciación ( $\text{m}/\text{año}$ )

$\Delta S$ : cambio en la superficie glaciar ( $\text{km}^2$ )

$\Delta ELA$ : cambio de la ELA ( $\text{m}/\text{año}$ )

R: período estudiado (años)

d. Realizar un pronóstico de reducción glaciar en base a escenarios futuros para la cuenca estudiada.

En base a los datos de desglaciación obtenidos del paso previo, se realizó un pronóstico de reducción glaciar en base a escenarios futuros con distintas tasas de desglaciación:  $1T_d$ ,  $2T_d$ ,  $3T_d$  y  $4T_d$  (Úbeda, 2011). La tasa de desglaciación no fue correlacionada con las variables climáticas (*ej. temperatura y precipitación*) ya que la data meteorológica de la cuenca no se encuentra actualmente en funcionamiento, y por ende la correlación puede no ser representativa por presentar mucho error.

Además, para establecer una correlación se necesita como mínimo un set de datos de 7 elementos (correlación de Spearman), que no fue viable ya que no hay suficientes imágenes satelitales con buena resolución para el área de estudio.

e. Proponer medidas de adaptación al retroceso glaciar.

En base a la revisión de la literatura se propusieron medidas adecuadas al retroceso glaciar para la cuenca estudiada, de acuerdo a las condiciones geográficas, políticas y demográficas de la zona.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Delimitación de la superficie de los glaciares para el año 1962 y 2014.

La figura 2 muestra la cuenca de la laguna Parón en el Parque Nacional Huascarán. Los glaciares de la cuenca se muestran delimitados y se muestra la ELA de los mismos para el año 1962.

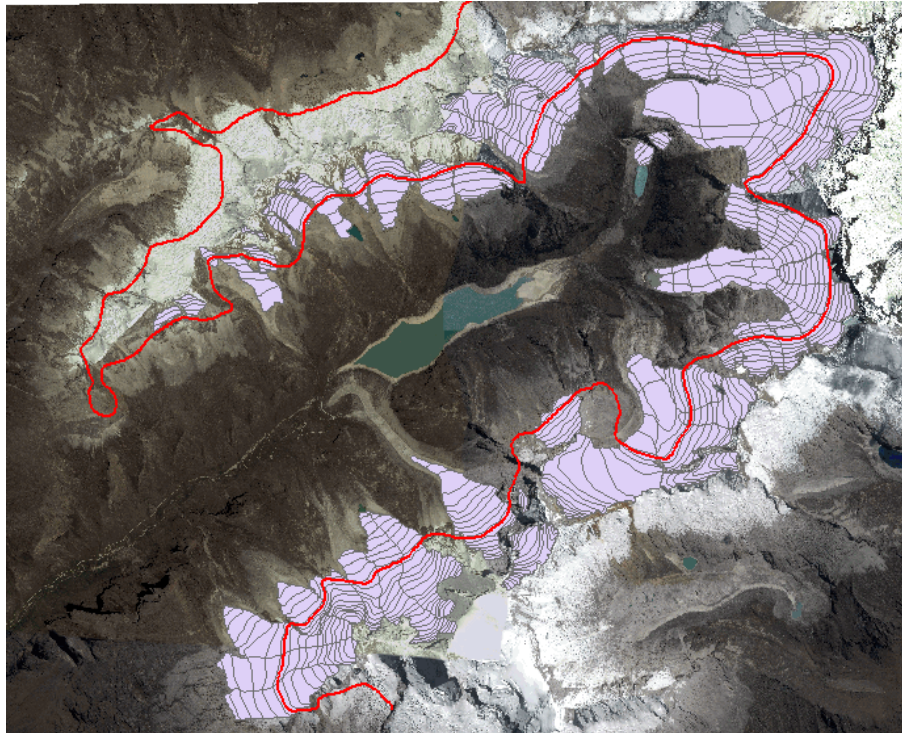


Figura 2. Imagen de los glaciares de la cuenca Parón para el año 1962 y su ELA.

FUENTE: Elaboración propia.

La figura 3 muestra la cuenca de la laguna Parón en el Parque Nacional Huascarán. Los glaciares de la cuenca se muestran delimitados y se muestra la ELA de los mismos para el año 2014.

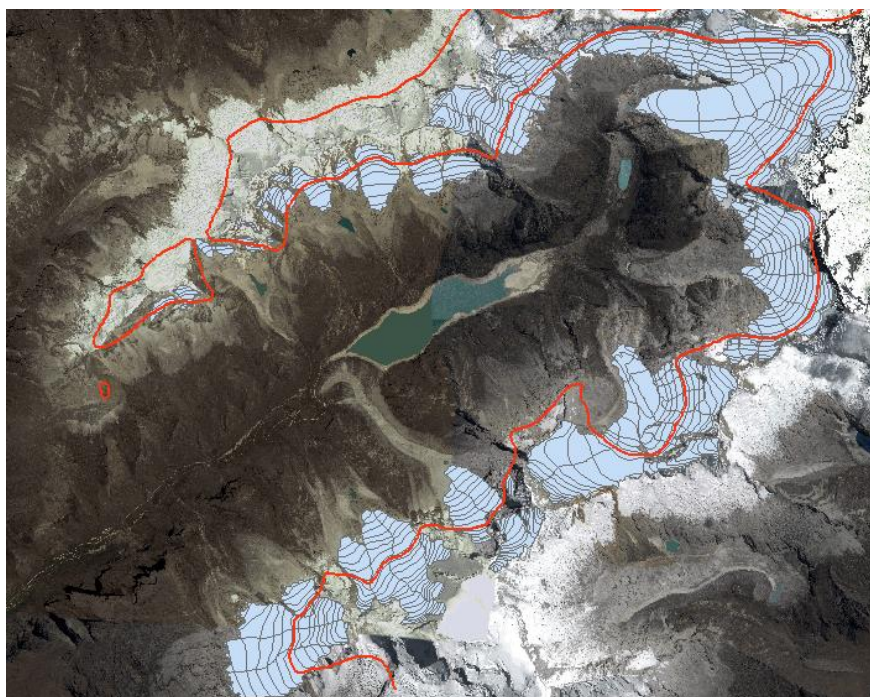


Figura 3. Imagen de los glaciares de la cuenca Parón para el año 2014 y su ELA.  
FUENTE: Elaboración propia.

4.2. Estimación de la altitud de la línea de equilibrio (ELAs) de los glaciares para el año 1962 y el año 2014.

La tabla a continuación muestra el resumen de datos del conjunto de glaciares estudiados.

**Tabla 1: Resumen del total de glaciares evaluados para el año 2014 y 1962**

Año	Número de glaciares	Total de área glaciár (km <sup>2</sup> )	ELA calculada (m)
2014	79	18.58	5271
1962	64	22.14	5170

De acuerdo a los resultados, el cálculo de la ELA para el año 2014 en la cuenca de Parón fue **5271m**. Utilizando el mismo procedimiento, el cálculo de la ELA para la misma cuenca en el año 1962 fue **5170m**. Se puede observar que la ELA ha aumentado notoriamente (100 metros aproximadamente), lo cual significa que los glaciares están retrocediendo. Existen otros estudios realizados en Perú utilizando la misma metodología de trabajo, bajo el proyecto CRYOPERU. En la cuenca del Sulcón, Vásquez (2015) calculó una ELA de 5246m para el año 2010, mientras que Quirós encontró que la ELA actual del Pariaqaqa fue de 5138 m durante el mismo año. Asimismo, Giráldez (2011) encontró que en la quebrada Hualcán la ELA para el año 2003 fue de 5124 m. Sin embargo, estos estudios no son comparables con la ELA calculada para el área de estudio ya que existe un desfase temporal entre los trabajos.

Cuando comparamos el aumento de la ELA con la disminución de área de los glaciares a lo largo de este período también podemos observar un patrón similar, concordando con una disminución del área glaciár. Esto coincide con resultados en distintos lugares del mundo, como el caso del Chacaltaya en Bolivia (Coudrain *et al.*, 2005; Emmer *et al.*, 2015; Zorzetto, 2013) y otros glaciares como Yanamarey, Uruashraju, Broggi, Gajap, Zongo, Antisana y Pastoruri (Rabatel *et al.*, 2013), entre



otros. El retroceso glaciar ha ocurrido con mayor intensidad desde aproximadamente 1970 y especialmente en los glaciares tropicales de la Cordillera Blanca en Perú (Vuille, 2013).

Esto es coherente con lo establecido por el IPCC en su quinto informe (IPCC, 2013), dado que la temperatura ambiental promedio ha aumentado desde 1950, lo cual trae consigo un derretimiento de los glaciares. Además, también se ha documentado que el cambio climático está afectando las temporadas de lluvia, tanto en su duración como en la época de inicio. Esto tiene repercusiones sobre la pérdida de masa glaciar pues si la temporada de lluvias disminuye, el período anual de acumulación se ve disminuido también y aumenta el efecto de la ablación (Vuille *et al.*, 2008). Además, consecuencia del cambio climático el período de lluvias en la Cordillera Blanca puede verse retrasado, con lo cual el balance de masa se vería afectado. De acuerdo a Sicart *et al.* (2011) y Rabatel *et al.* (2012) citado en Rabatel *et al.* (2013) existen tres regímenes climáticos para los glaciares en los *outer tropics*:

(1) La estación seca que va de mayo a agosto, en la que el derretimiento es bajo debido a un déficit de radiación de onda larga como consecuencia de una baja nubosidad en la región andina durante esta temporada.

(2) La estación de transición, que va de septiembre a diciembre, cuando la precipitación no es aún abundante. Las temperaturas aumentan progresivamente y el albedo disminuye, generando un aumento en el escurrimiento del agua proveniente de glaciares.

(3) La estación húmeda que va de enero a abril. Durante este período la precipitación en forma de nieve aumenta, disminuyendo la tasa de derretimiento del hielo. Sin embargo el derretimiento igual continúa por las altas temperaturas y la radiación de onda larga consecuencia de la nubosidad.

De esta forma, el balance de masa anual depende en gran medida del inicio de la temporada de lluvias fuertes, ya que esto interrumpe la fuerte ablación que domina entre septiembre y diciembre. Cualquier retraso del período de lluvia causaría un fuerte impacto negativo en el balance de masa debido a un aumento del período de ablación y disminución del período de acumulación (Rabatel *et al.*, 2013; Kaser y

Georges, 1997), lo cual es frecuente durante eventos El Niño (Wagnon *et al.*, 2001) que aumentarán en frecuencia consecuencia del cambio climático.

Por otro lado, un aumento de las temperaturas también afectaría la precipitación de tal forma que, en lugar de caer en estado sólido, caería en forma de lluvia lo cual disminuiría la acumulación y favoreciendo la ablación en el glaciar (Huss, 2012).

Autores en diferentes partes del mundo han estado estudiando el retroceso glaciar como consecuencia del cambio climático y muchos concuerdan con el retroceso (Thompson *et al.*, 2011; Vuille *et al.*, 2008). Sin embargo, la mayoría de estos resultados se basan en reducción del área y volumen mediante monitoreo de imágenes satelitales. En ese sentido, este trabajo presenta una metodología alternativa para el cálculo del retroceso glaciar.

Conocer el parámetro de altitud de la línea de equilibrio es importante para entender los procesos que ocurren en el glaciar. Este parámetro indica una línea imaginaria que divide la zona de acumulación de la zona de ablación. Si este parámetro se encuentra por encima de la cota de una montaña, significaría que la zona de acumulación en dicha montaña es inexistente, condenando al glaciar a desaparecer en el tiempo. Según nuestros resultados, la ELA de la cuenca glaciar de Parón en la actualidad aún se encuentra por debajo de la cota de este grupo de montañas. Sin embargo sí existe una notoria elevación en este parámetro desde el año 1962.

4.3. Cálculo de las tasas de desglaciación entre las fechas escogidas, en función de la variación observada en superficies ( $\text{km}^2/\text{año}$ ) y ELAs ( $\text{m}/\text{año}$ ).

La tabla a continuación muestra la tasa de desglaciación en función al área y a la ELA para el período 1962-2014.

**Tabla 2:** Tasas de desglaciación en función a la reducción del área y elevación de la ELA para el período estudiado.

Período	Tiempo	$Td_{\text{ÁREA}}$	$Td_{\text{ELA}}$
1962-2014	52	0.068	1.942

Según los resultados del presente estudio existe una reducción de  $0.068 \text{ km}^2/\text{año}$  y una elevación de la ELA de  $1.942 \text{ m}/\text{año}$ .

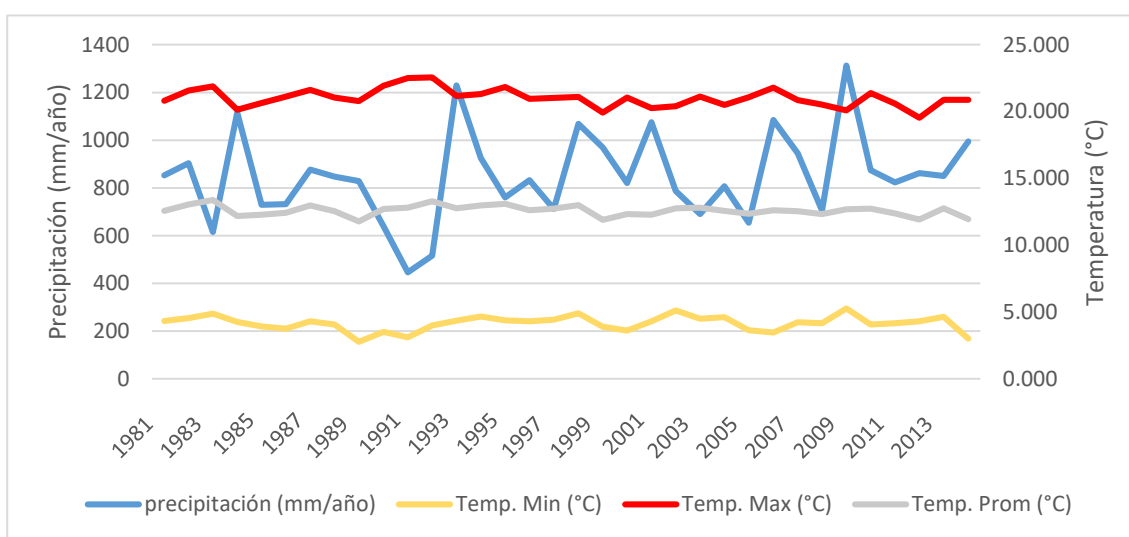


Figura 4. Precipitación, Temperatura máxima, mínima y promedio de la región estudiada (Áncash) para los años 1981-2013. FUENTE: Elaboración propia a partir de SENAMHI. 2016, Estación de Recuay (3431 m.s.n.m).

Complementario al análisis de la evolución glaciaria se obtuvieron datos meteorológicos del SENAMHI para el período 1981-2013, de tal forma que sirvan

para el análisis y discusión de la presente investigación. Aunque los datos de temperatura y precipitación no muestran un patrón de aumento o disminución marcado, esto se puede deber a que el período de los datos es aún muy corto. Sin embargo, de acuerdo a los datos del IPCC en su reporte final para tomadores de decisiones (IPCC, 2013) la temperatura a nivel global ha aumentado entre 0.2 y 0.4°C entre 1950 y el 2000 aproximadamente, y en los futuros escenarios el aumento de la temperatura al 2100 podría ser de 1°C en el escenario RCP 2.6 y de 4°C en el escenario RCP2.8. Por este motivo realizar monitoreo de las variables meteorológicas in situ es de suma importancia para entender el clima a un nivel regional y local, ya que en la actualidad aún falta un seguimiento de largo plazo a estos datos.

4.4. Realizar un pronóstico de reducción glaciaria en base a distintos escenarios futuros para la cuenca estudiada.

Las tablas a continuación muestran las tasas de desglaciación proyectadas al año 2064 (50 años a futuro del período estudiado) y las áreas y ELA del área de estudio en función a 4 escenarios planteados: 1Td, 2Td, 3Td y 4Td.

**Tabla 3:** Tasas de desglaciación en función a la reducción del área y elevación de la ELA para escenarios futuros.

Período	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
	TdÁrea	TdELA	TdÁrea	2TdELA	TdÁrea	3TdELA	TdÁrea	5TdELA
2014-2064	0.0658	0.0658	0.132	3.74	0.197	5.60	0.33	9.34

**Tabla 4:** ELA y área glaciar según los tres escenarios futuros propuestos para el año 2064.

Escenario futuro	ELA (m)	Área glaciar (km <sup>2</sup> )
Escenario 1	5364	15.29
Escenario 2	5458	12.00
Escenario 3	5551	8.71
Escenario 4	5738	2.12

Según las tasas de desglaciación y el pronóstico a futuro del presente estudio, si la tasa de desglaciación en los próximos 50 años llega a ser tres veces la del período pasado, la reducción de la masa glaciar sería de más de la mitad con relación a la actual, y el aumento de la ELA sería preocupante pues estaría cerca de las cotas máximas de algunas montañas. Esto significaría que la zona de acumulación sería casi inexistente y por lo tanto compromete la salud del glaciar, destinándolo a desaparecer. Incluso, asumiendo una tasa de desglaciación cuatro veces mayor a la pasada, el aumento de la ELA la llevaría a un nivel mayor que algunas cotas de la cuenca. Esto indica que el conjunto de glaciares de la cuenca estaría cerca de desaparecer en un corto periodo. Además, bajo este mismo escenario, el área glaciar perdería alrededor del 90 por ciento de su masa actual. Esto significaría una pérdida significativa para la cuenca y una amenaza a las poblaciones locales por escasez de agua y por desbordes de lagunas glaciares.

#### 4.5. Proponer medidas de adaptación al retroceso glaciar.

El retroceso glaciar es un suceso de suma importancia el cual tendrá un impacto en diversos aspectos y cada uno de estos debe ser considerado para una gestión integrada de la cuenca.

En primer lugar, los glaciares son la principal fuente de agua durante la estación seca en las regiones andinas especialmente en zonas tropicales, cuando la

precipitación no genera aporte a la escorrentía (Bradley *et al.*, 2006). Además, estos son también una fuente de agua para la zona agrícola ubicada en la zona baja de la cuenca, en las zonas costeras de Ancash (Villanueva, 2011).

El retroceso glaciar además trae como consecuencia potenciales desastres por avenidas repentinas por desbordamiento de lagunas glaciares -GLOF por sus siglas en inglés (Guardamino, 2014). En la actualidad estas lagunas ya se están formando en diferentes cuencas, incluida la cuenca del presente estudio. En la quebrada de Hualcán la Cooperación Suiza en convenio con el MINAM y la ANA estuvieron realizando monitoreo a la laguna 513 mediante un sistema de alerta temprana, con el cual se podían prever aludes y así tomar las medidas de evacuación adecuadas.

Por otro lado, el Parque Nacional Huascarán tiene un fuerte turismo orientado a los deportes de alta montaña, especialmente la escalada en hielo y el andinismo. Sin embargo, este escenario disminuirá en el futuro debido a que en principio aumentará el riesgo de estas actividades, y eventualmente podría disminuir significativamente, como ya sucedió en el glaciar Pastoruri (ANA, 2015). Esto, a su vez, se traducirá en pérdidas económicas que constituyen uno de los ingresos del Parque (SERNANP, 2010).

Además, el retroceso glaciar tendrá también un impacto en los ecosistemas naturales de alta montaña que dependen de estos. Algunos de estos ecosistemas son los bofedales alto andinos, las lagunas alto andinas y los bosques de *polylepis*. Si bien un retroceso glaciar se puede traducir en un aumento de la escorrentía, esta alteración del régimen hídrico alteraría la distribución de los ecosistemas y por lo tanto las poblaciones de las especies que de estos dependen. Algunos estudios concluyen que un aumento de 3°C en la temperatura podría ocasionar una elevación de 600 metros en las especies generando una pérdida de hábitat (Herzog *et al.*, 2012). También se concluye que especialmente el ecosistema de páramo será bastante afectado por este incremento de la temperatura, ya que su distribución

natural ocurre en forma de parches y un aumento de la temperatura generará mayor fragmentación de hábitat. Además, en estos ecosistemas existe una gran cantidad de biota endémica, lo cual exacerba la situación (Herzog *et al.*, 2012).

Para abordar el problema de la escasez del recurso hídrico, el gobierno regional deberá promover la construcción de represas que puedan suministrar agua en las temporadas de sequía. Sin embargo, esto debe ser supervisado y regulado cautelosamente por la autoridad ambiental competente debido a que la construcción de represas tiene consecuencias sociales y ambientales. En la actualidad existen casos de conflicto por parte de las comunidades campesinas con respecto al uso del agua, como es el emblemático caso de la represa en la laguna Parón (French, 2012; Untiveros, 2011). Por otro lado, el gobierno regional también debe promover el desarrollo de sectores distintos a la agricultura y la minería, debido a que ambos sectores; dos de los principales sectores productivos en la región actualmente (BCRP, 2016) son sectores que demandan volúmenes elevados de agua. Un sector que deberá ser reforzado será el sector turismo, ya que este tiene el potencial de promover un desarrollo sustentable para la región.

El monitoreo de las GLOF es también un aspecto relevante a considerar pues estas han sido motivos de pérdidas humanas y económicas. La laguna 513 y laguna Palcacocha son dos lagunas de formación glaciaria que ya han ocasionado pérdidas anteriormente motivo por el que la Unidad de Glaciología de la ANA está haciendo monitoreo de estas y otras lagunas (Torres, 2014). Específicamente, en el año 1941 la laguna Palcacocha tuvo una ruptura que ocasionó pérdidas económicas y al menos 4800 personas fallecieron (Chacón *et al.*, 2005; ANA, 2013). En la actualidad, la situación es más crítica debido a que la población ha aumentado y por lo tanto también el riesgo, y además la laguna ha aumentado su volumen de 514 800 m<sup>3</sup> a 17 325 207 m<sup>3</sup> desde 1972 hasta el 2009. Sin embargo, complementario a este trabajo que se viene realizando debe reforzarse la difusión y comunicación del mismo, ya que las comunidades campesinas no siempre comprenden el riesgo al

que están expuestas, además de la desconfianza que pueden sentir ante investigadores extranjeros.

Si bien el sector turismo debe ser reforzado para lograr un desarrollo más sostenible en la región, el turismo también deberá ser re orientado. En la actualidad, el turismo de aventura es el que predomina, específicamente el turismo en alta montaña. La Cordillera Blanca ofrece una variedad de retos para la escalada en hielo por poseer picos entre 5000 y 6000 metros, además de diversos niveles de dificultad. Además, es considerablemente económico a comparación de otras zonas en Sudamérica. Todo esto lo convierte en un lugar ideal para la práctica del deporte de alta montaña, y como lugar de entrenamiento para los más profesionales que luego irán a montañas con más altitud y reto, como las cordilleras Himalaya o Karakórum.

Sin embargo, el retroceso glaciar también tendrá un impacto en este escenario. Por este motivo, se debe reforzar el turismo de media montaña. En la actualidad sí se practica el turismo de media montaña, no obstante, existen diversas rutas que se podrían implementar y aún no se encuentran debidamente implementadas para el turismo (SERNANP, 2010). Además, se podrían sugerir nuevas rutas para diversificar la propuesta, o de lo contrario se saturarían las zonas turísticas actuales por exceder la capacidad de carga. Esto además implica que se deben realizar estudios de capacidad de carga en cada una de las quebradas donde se oferten servicios.

Complementario al turismo de montaña, se deben reforzar otras líneas de turismo *outdoor*. Por ejemplo, el turismo de fotografía nocturna, astrofotografía y fotografía en naturaleza. La Cordillera Blanca posee una belleza escénica inigualable, ejemplo de esto es que el nevado Alpamayo haya sido considerado el nevado más hermoso del mundo (SERNANP, 2010). Existen grupos de fotografía en la ciudad de Huaraz como por ejemplo “Club Fotográfico Huaraz”, “Astrofotografía”, entre otros, quienes se organizan y salen los fines de semana a hacer rutas para fotografía, sin



embargo estas salidas son iniciativas de la sociedad, de grupos colectivos y en algunos casos incluso individuales. Estas ideas deben ser apoyadas por el gobierno y empresas privadas para lograr establecer rutas definidas en las que se puedan realizar estas actividades, y así también puedan ser ofertadas. En otras regiones de Perú ya se realiza este tipo de turismo, como por ejemplo en Cusco, en la Reserva Nacional Tambopata y en el Parque Nacional Manu, en los que se han definido circuitos exclusivamente para la fotografía.

La escalada en roca también es un turismo que tiene potencial para ser desarrollado en Huaraz, ya que existen diversos niveles de dificultad como el bosque de piedras de Hatun Machay para quienes recién están iniciando, o La Esfinge y La Torre Parón para quienes busquen un reto mayor. Sin embargo, el bosque de piedras de Hatun Machay en la actualidad no es una oferta turística que las agencias ofrezcan con frecuencia. El bosque se encuentra administrado por un privado (Andean Kingdom) en convenio con la comunidad campesina Pampas Chico, y quienes van usualmente son personas con interés específicos de escalada, en especial turistas extranjeros (MINCETUR, 2001), ya que no está debidamente promocionado. Complementando la escalada, también se deben implementar otras formas de deporte de aventura como kayak, canotaje y zipline.

Además, el turismo de avistamiento de aves o *birdwatching* también debe ser promovido ya que en el Parque existen al menos 15 especies endémicas para Perú, incluyendo el Ancash Tapaculo (*Scytalopus affinis*) que es exclusivo a la región de Ancash. Este tipo de turismo está creciendo considerablemente a nivel mundial, y Perú es un destino competente por ser el tercer país con mayor diversidad de aves en el mundo (Angulo, 2014). Aunque a nivel de Perú este tipo de turismo está creciendo, en el Parque Nacional Huascarán este no ha sido promocionado ya que todo el turismo se ha concentrado principalmente en el trekking o la alta montaña. En otros países como Ecuador o Colombia el turismo de avistamiento de aves está promocionado desde el gobierno central, incluso en regiones de montaña. Según una noticia publicada por la BBC Mundo (2016), el turismo de avistamiento de fauna silvestre mueve en Estados Unidos alrededor de US\$ 32 000 millones al año. Cerca de Quito se puede ir a avistar el colibrí Zamarrito pechinegro (*Eriocnemis*

*nigrivestis*), que incluso es considerado el emblema de Quito. Incluso, en Perú ya se han establecido circuitos de avistamiento de aves como el circuito Nor Oeste y el circuito Sur en Madre de Dios y Cusco. Esto debe tomarse como modelo para la región Ancash, combinando diversas estrategias que le permitan ser una potencia turística dentro de Perú. En la actualidad estas ofertas son escasas o nulas. Lograr esto requiere estrategias de parte del estado; específicamente SERNANP a través de la Jefatura del Parque y la DIRCETUR; y del sector privado a través de las agencias de turismo, para promover otro tipo de actividades dentro del parque ya que el turismo es una de las fuentes de ingresos de este.

Con respecto a los impactos que el retroceso glaciar tendrá en los ecosistemas alto andinos se deben tomar realizar varias estrategias para poder abordar este problema. En principio, se deben ampliar las líneas de investigación. Existe mucha literatura con respecto al cambio climático y sus impactos en el retroceso glaciar. Sin embargo, entender cómo este impactará la diversidad biológica es aún más complejo y dichos estudios son escasos en Sudamérica en general (Ruiz *et al.*, 2004). Se debe fomentar el trabajo de las universidades en convenio con el Parque para la realización de tesis de pre grado. Además, ONGs e instituciones que trabajen dentro del Parque deben promover becas enfocadas en el eje de diversidad biológica. Además, es importante instaurar monitoreos continuos de algunos grupos de flora y fauna para entender la dinámica de las comunidades a largo plazo. Además, se debe promover la reforestación con especies arbóreas nativas como *polylepis*. Esto no solo tendría un impacto positivo sobre la fauna silvestre de la zona, sino que además mejora las características del suelo, protegería las laderas de posibles derrumbes y favorece la retención de agua actuando como un regulador natural del ciclo hidrológico. Sin embargo, esta medida de reforestación debe ser supervisada y posteriormente el crecimiento de estos árboles monitoreados para garantizar que se tenga el efecto deseado. En la actualidad se han realizado intentos de reforestación, sin embargo, estos han fallado por falta de monitoreo y consideraciones técnicas que la especie requiere para su debido crecimiento (D. valle com. pers).

En el Parque Nacional Huascarán existen alrededor de 131 especies de aves, de las cuales 15 son endémicas de Perú (Schulenberg *et al.*, 2010). Investigación sobre estas especies debe ser también reforzada debido a que representan un potencial para el turismo de avistamiento de aves como ya se mencionó anteriormente. De estas especies, existen algunas que están asociadas a bosques de *polylepis*, reforzando la idea de la reforestación con este tipo de bosques. Sin embargo, existen otras especies que están asociadas a otro tipo de hábitats alto andinos como por ejemplo el colibrí Cometa de vientre gris (*Taphrolesia griseiventris*). Esta especie es endémica de Perú y está amenazada según la categoría nacional según la categoría internacional de especies amenazadas (MINAM, 2014). Además, esta especie es considerada como rara en su distribución (Schulenberg *et al.*, 2010), y una de las especies más raras del mundo (Hirschfeld *et al.*, 2013). Esta especie tiene una localidad conocida en la zona de Cajamarca. Sin embargo, existen tres registros de la especie en el Parque Nacional Huascarán. Esto es de suma importancia ya que al ser una especie rara y considerada como críticamente amenazada, requiere estrategias urgentes para su conservación. Sin embargo, la única área protegida dentro de su distribución es el Parque Nacional Huascarán, aunque en este se conozcan muy pocos avistamientos de la especie. Además, los registros de esta especie no están asociados a hábitat de *polylepis*. Todo esto resalta la importancia de promover el conocimiento y la investigación científica de la diversidad de aves y biológica en general del Parque.

Complementario a todas las estrategias previamente mencionadas, se debe trabajar en cada una de ellas de cerca con la educación ambiental en los colegios. Es importante que la población local se sienta identificada con el Parque y empoderados para poder ser sensibles a su conservación. Se debe promover eventos en la ciudad de tipo cultural y científico como talleres de arte y teatro, exposiciones fotográficas, charlas de los avances científicos, para poder causar un efecto en la población. Esto requiere una sinergia entre las municipalidades, universidades, colegios, empresas, ONGs y diversos actores. En la medida de lo posible, desde colegios trabajar con la valoración de la diversidad biológica local. Estos proyectos

pueden ser propuestos a la gestión de recursos humanos de las empresas que trabajen en el parque como por ejemplo mineras e hidroeléctricas.

Finalmente, a nivel Nacional también se debe generar una estrategia de cambio en la matriz energética. Después de la energía proveniente del gas, la segunda fuente de energía eléctrica en Perú son las hidroeléctricas (MEM, 2016). Sin embargo, a largo plazo estas ya no serán sostenibles en caso de un retroceso glaciario muy acelerado como lo estimado en el escenario 3Td. Esto requiere una medida preventiva, ya que algunas ciudades como Chiclayo, Piura, Trujillo, Huaraz, Lima, entre otras dependen de hidroeléctricas para su electricidad. Esto es relevante considerando que solo Lima tiene una población de aproximadamente 9 834 631 personas (INEI, 2015), siendo esto aproximadamente el 30 por ciento de la población de todo el país.

El cambio climático está sucediendo a un ritmo acelerado de tal forma que el gobierno central y los gobiernos regionales deben encontrar medidas de adaptación a este, dado que la mitigación no será suficiente para detener o revertir el retroceso glaciario. Recientemente se aprobó la Ley N° 30215 MINAM - Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. Esta Ley es una primera herramienta que el Parque puede utilizar para los servicios ecosistémicos que los glaciares proveen. De esta forma, se pueden establecer acuerdos que permitan retribuir económicamente la parte alta de la cuenca por parte de la cuenca baja, ya que son estas zonas las principales en beneficiarse de la regulación del ciclo hidrológico. Además, esta ley también podrá implementar mecanismos que regulen los beneficios de empresas y compañías extractoras que se sirven de los servicios ecosistémicos de esta región, como por ejemplo empresas mineras e hidroeléctricas. Sin embargo, el reglamento recién ha sido aprobado y por lo tanto tardará en tener algún efecto práctico.

## V. CONCLUSIONES

1. El retroceso glaciar en la cuenca de la laguna Parón del Parque Nacional Huascarán para el período 1962-2014 fue de  $0.068 \text{ km}^2/\text{año}$  y  $1.942 \text{ m/año}$ .
2. Si las tasas de desglaciación se mantienen constantes en el futuro con respecto a las de los últimos 50 años, la disminución no será tan drástica. Sin embargo, de duplicarse y especialmente triplicarse la tasa de desglaciación a futuro, el glaciar habrá perdido más de la mitad del área glaciar que tiene actualmente. De quintuplicarse las tasas, los glaciares habrán perdido 86 por ciento de su área actual.
3. Se requiere mejorar la investigación para entender la relación entre tasas de desglaciación y patrones de clima local para pronosticar acertadamente las tasas de desglaciación a futuro. Esto permitirá mejorar la gestión del recurso, re asentar poblaciones vulnerables y diversificar la propuesta de turística del Parque Nacional Huascarán.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Para complementar esta metodología y donde sea posible es importante comparar los resultados con los del monitoreo in situ pues esto serviría para validar y ajustar la metodología. Actualmente la ANA está monitoreando algunos glaciares en la cordillera, entre ellos un glaciar del Artesonraju. Esta información será de valioso input para la metodología en la presente investigación, que podría ser utilizada en conjunto con los resultados aquí mostrados.
2. Una limitación de la presente metodología es que el método asume que se está trabajando sobre la base de área glaciar y no nieve. En latitudes altas se trabaja mediante la asunción que al finalizar la temporada de verano toda la nieve se ha derretido y queda solamente el área glaciar. Esto se podría aplicar también en los trópicos, sin embargo, la diferenciación entre los períodos de lluvia fuertes, moderados y la época seca dificultan la determinación de la temporada ideal. Se sugiere trabajar con imágenes satelitales en futuras investigaciones, aunque la adquisición de estas es aún limitada para la escala requerida, o no viable económicamente hablando. Más aún, la adquisición de imágenes satelitales también está limitada a una escala temporal reciente, haciendo el trabajo sobre glaciares del año 1962 imposible con este método.
3. Como alternativa se trabajó con el software Google Earth, sin embargo, la calidad de las imágenes puede ser una limitante a la hora de delimitar glaciares ya que si la imagen no tiene buena resolución diferenciar entre glaciar y nieve es complejo, especialmente si la fotografía fue tomada durante la temporada de lluvias cuando ocurre la acumulación. Para abordar este problema en la presente investigación se realizó una visita de campo durante el fin de la temporada de lluvias en la que se recopilaron fotografías de toda el área de estudio con buena nitidez, lo cual permitió

que la delimitación sea más acertada para el año 2014. Sin embargo, eso no fue viable para los glaciares del año 1962. En este caso se trabajó con fotografías aéreas ya existentes y la limitante a la hora de la delimitación de los glaciares es algo a considerar como fuente de error en el presente trabajo.

4. Una sugerencia interesante para próximas investigaciones sería el cálculo de la ELA para un número mayor de períodos de tal forma que se pueda obtener un conjunto de datos de ELA y un conjunto de datos meteorológicos correspondientes, y así poder modelar la influencia de las variables climáticas sobre la ELA con modelos lineales generalizados (GLM por sus siglas en inglés).
5. Finalmente, es importante que el retroceso en la ELA y el área glaciar se traduzcan en volúmenes de agua con el uso de Modelos de Elevación Digital (DEM) lo cual tendría implicancias prácticas sobre el recurso hídrico para la población y la demanda. Esto podría ayudar a entender la escasez que se prevé del recurso y facilitar el manejo de este en diferentes escenarios futuros.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Geophysical Union Conference. Chisolm, R., McKinney, D., Gomez, J., Voss, K., 2012. Emerging Glacial Lakes in the Cordillera Blanca, Peru: A Case Study at Arteson Glacier.
- ANA, 2013. Informe técnico colegiado sobre las acciones, actividades y proyectos que deben ejecutarse, para disminuir el riesgo de desastre por desembalse de la laguna Palcacocha.
- ANA, 2015. Evaluación de glaciares tropicales lagunas y bofedales en un contexto de Cambio Climático. Santillan, N. & García, E.
- Angulo, E. 2014. ¡Ya no somos el segundo país en el mundo con el mayor número de aves! Rumbos de Sol y Piedra. Disponible en: <http://www.rumbosdelperu.com/-ya-no-somos-el-segundo-pais-en-el-mundo-con-el-mayor-numero-de-aves--V1810.html>
- BBC Mundo. 2016. El sorprendente potencial económico de la industria del avistamiento de aves.
- BCRP. Banco Central de Reserva Perú. Caracterización de Ancash 2016.
- Benn, D. y Lehmkuhl, F. 2000. Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* (65-66): 15-29



- Bradley, R. S., Vuille, M.; Diaz, H. F. y Vergara, W. 2006 “Threats to Water Supplies in the Tropical Andes” Science. Volumen 312. Número 5781, p. 1755-1756
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A., and Gomez Lopez, R. J. 2011. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. Climatic Change, Volume 105, p.179–206
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K.R., McKenzie, J.M., Baraer, M., French, A. and Polk, M. H. 2013. New Geographies of Water and Climate Change in Peru: Coupled Natural and Social Transformations in the Santa River Watershed. Annals of the Association of American Geographers, 103:2, p. 363-374
- Brown, P. 2013. Climate News Network. Andes Tropical Glaciers going fast (en línea). Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.climatenewsnetwork.net/andes-tropical-glaciers-going-fast/>
- Chacón, N., Jacay, J. & Iván M. Procesos Geodinámicos en el Área Río Quillcay, Huaraz – Ancash. 2005. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. Volumen 8 (16). 22-28 p.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992. Consultado en Agosto 2015. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Coudrain, A., Francou, B. y Kundzewicz, Z. W. 2005 “Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources”. Hydrological Science Journal des Sciences Hydrologiques. Volumen 50, p. 925-932

- Emmer, A. Loarte, E. C., Klimes, J. and V. Vilímek. 2015. Recent evolution and degradation of the bent Jatunraju glacier (Cordillera Blanca, Peru). *Geomorphology* (228). 345–355 p.
- Fernández, A. 2014. Derretimos los glaciares: por qué es importante evitarlo. Consultado en Julio 2015. Disponible en: [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/naturaleza/2014/09/01/220505.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/naturaleza/2014/09/01/220505.php)
- Ferrando, F. 2014. Análisis y propuesta de definición de “glaciar”. Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=18201&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>
- Francou, B. 2015. The Guardian. Global warming spells disaster for tropical Andes glaciers (en línea). Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.theguardian.com/science/2015/jan/27/global-warming-glacier-depletion-andes>
- French, A. 2012. Laguna Parón: ¿hacia la gestión integrada de recursos hídricos? *La Revista agraria* 136. 10p.
- Geoindicators, IUGS. Consultado en Agosto 2015. Disponible en: <http://www.lgt.lt/geoin/doc.php?did=geoindicators>
- Giráldez, C. (2011). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú). Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid.
- Grove, J. M. 1988. *The Little Ice Age*. Vol. 14. 1989. p. 372-374

- Guardamino Soto, L. Y. 2014. Análisis de la evolución de las lagunas de alta montaña en la cordillera del Vilcabamba (Cusco y Apurímac) entre los años 1991-2014 mediante métodos de sensoramiento remoto y SIG. Tesis para optar el título de Licenciada en Geografía y Medio Ambiente. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. p. 1-4
- Gutiérrez, E. & I. Trejo. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 179-188 p.
- Herzog, S., Martinez, R., Jorgensen, P. & H. Tiessen. 2012. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Hirschfeld, E., Swash, A. & R. Still. 2013. *The World's Rarest Birds*. Princeton University Press. New Jersey, United Kingdom. 298 p.
- Huddard, D. y Stott, T. 2010. *Earth Environments. Past, present and future*. John Wiley & Sons 912 pp.
- Huss, E.G. 2015. *Quantifying glacier sensitivity to Late Glacial and Holocene climate changes in the Southern Peruvian Andes*. Tesis presentada para optar el grado de Master en Ciencias. University of New Hampshire, Estados Unidos.
- INEI, 2015. *Compendio Estadístico Perú 2015*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001. *Third Assessment Report – Climate Change*.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2013. Cambio Climático 2013. Bases Físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014. Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Jacobsen, A., Milner, M. and Dangles, O. 2012. Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature*. Volume 2. p. 361–364
- Kaltenborn, B. P., Nellesmann, C., Vistnes, I. I. 2010. High mountain glaciers and climate change: Challenges to human livelihoods and adaptation.
- Kaser, G. & Georges, C. 1997. Changes of the equilibrium.-line altitude in the tropical Cordillera Blanca, Peru, 1930-50, and their spatial variations. *Annals of Glaciology*. Volume 24. p. 344-349
- Kaser, G. y Georges, C. 1999. “On the mass balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca” *Geografiska Annaler*. Volumen 81A, p. 643-651.
- Kaser, G. y Osmaston, H. 2002. *Tropical Glaciers*. New York: Cambridge University Press, 209 p.
- Knight, P. G. 1999 *Glaciers*. Primera edición. Cheltenham: Stanley Thornes, 261 pp.
- Koch, J. 2015. Little Ice Age and recent glacier advances in the Cordillera Darwin, Tierra del Fuego, Chile. *Anales Instituto Patagonia*. Volume. 43(1). p. 127-136

- Leonard, K. C. and Fountain, A.G. 2003. Map-based methods for estimating glacier equilibrium-line altitudes. *Journal of Glaciology*. Volume 49. No.166. p. 329-336
- MEM, 2016. Estadística Preliminar del Subsector Electricidad: Cifras de Agosto 2016.
- Malcolm, J. 2006. Global Warming and Extinctions of Endemic Species from Biodiversity Hotspots. *Conservation Biology*. Volume 20. Issue 2, p. 538-548.
- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J.M., French, A. and Baraer, M. 2010. Climate Change and Tropical Andean Glacier Recession: Evaluating Hydrologic Changes and Livelihood Vulnerability in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4) p. 794–805
- MINAM, 2014a. Especies de fauna silvestre peruana en los apéndices de la CITES. Actualización del Listado de Especies de Fauna Silvestre Peruana en los Apéndices de la CITES luego de la Decimosexta Reunión de la Conferencia de las Partes (COP 16).
- MINAM, 2014b. La COP20 de Lima celebró el Día Internacional de las Montañas analizando la problemática del agua y los glaciares. Nota de prensa. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/la-cop20-de-lima-celebro-el-dia-internacional-de-las-montanas-analizando-la-problematika-del-agua-y-los-glaciares/>
- MINAM, 2014c. LEY 30215. Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. *El Peruano*. 29- 06- 2014.
- MINCETUR, 2001. Inventario Turístico: Bosque de Piedra Hatun Machay.

- 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*. Volume 138–139. p. 22-31
- Painter, J. 2007 “Deglaciation in the Andean regions. Human Development Report Office Occasional Paper”. PNUD, 21 p.
- Peredo Beltrán, E. Glaciares, agua y biodiversidad. 2010. Tunupa. Boletín N° 64.
- PNUMA. Curso de Glaciología. 2010, Santiago de Chile. Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20IBEROAMERICANO%20DE%20GLACIOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS/PONENTES/Tema%201%20Definicion%20Clasificacion%20Glaciares/01%20Definicion-clasificacion.pdf>
- Poveda, G. and Pineda, K. 2009. Reassessment of Colombia’s tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Advances in Geoscience*. 22. p. 107–116.
- Quirós, T. 2013. Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa (Perú). Tesis para optar al grado en Geografía y Ordenación del Territorio. Madrid, España. Universidad Complutense De Madrid.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J. L. Cevallos, Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., HuggeL, C. Scheel, M. Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégos, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M. y Wagnon, P. 2013 “Current state of glaciers in Tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change” *The Cryosphere*. Volumen 7, p. 81-102
- Ruiz, O., Aguirre, L.F., Vargas, R., Aguayo, R., Alfaro, F. & K. Moya. 2004. Protocolo de Investigación para la Fauna Altoandina del Parque Nacional Tunari,

Parte I: Mamíferos, Anfibios y Reptiles. Documentos en Biodiversidad y Conservación. 1: 1-27p.

- Sánchez, G., Ballesteros, C. & N. Pavón. 2011. Cambio Climático: Aproximaciones para el estudio de su efecto en la biodiversidad.
- Schulenberg, T. S., Stotz, D. F., Lane, D. F., O' Neill, J. P. & T. A. Parker. 2010. Aves del Perú. Serie Biodiversidad CORBIDI 01. Lima, Perú, pp. 1-660.
- SENAMHI. Datos Históricos Ancash. Disponible en: [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi)
- SERNANP. Plan Maestro del Parque Nacional Huascarán 2010-2015.
- Tarbuck, E.J. & F.K. Lutgens. 2005. Ciencias de la Tierra. 8va edición.
- The IUCN Red List of Endangered Species. Consultado el 15/06/2016.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. and Breche, H. 2011. Tropical Glaciers, Recorders and Indicators of Climate Change, Are Disappearing Globally. *Annals of Glaciology*. Volume 52 (59). p. 23-34
- Torres, J. 2014. Alertan sobre riesgo de desborde de laguna por desglaciación. *Andina*
- Úbeda, J. 2010. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los andes centrales). Tesis para optar al grado de Doctor. Madrid, España. Universidad Complutense De Madrid.
- Úbeda, J., Castillo, M., Fidel, L. y P. Vásquez. 2014. Geoindicadores del cambio climático deducidos de la observación Criósfera en los Andes Centrales (CRYOPERU). ResearchGate.

- UNEP, 2013. Where will the water go? Impacts of accelerated glacier melt in the Tropical Andes. Consultado en Agosto 2015. Disponible en: [http://na.unep.net/geas/getUNEPPageWithArticleIDScript.php?article\\_id=104](http://na.unep.net/geas/getUNEPPageWithArticleIDScript.php?article_id=104)
- Untiveros, M. 2011. Balance hídrico de la laguna parón, herramienta para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en la cuenca del río santa. Tesis para optar el Título de INGENIERO CIVIL: Universidad Católica del Perú.
- Vásquez, P., 2015, El registro glacial del cambio climático en el Macizo Sulcón (sector septentrional de la Cordillera Pariaqaqa). Tesis de Ingeniería: Universidad Nacional del Altiplano (Puno), 92 p.
- Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A. y Haeussling, S. 2007 “Economic Impacts of Rapid Glacier retreat in the Andes” EOS Transactions, American Geophysical Union. Volumen 88, Número 25, p. 261-268.
- Villanueva, R. 2011. Características de la Cuenca del Río Santa. Folleto 1. UICN-WANI- Insituto de Montaña. Huaraz, Perú.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. y Bradley, R. 2008 “Climate Change and Tropical Andean Glaciers: Past, present and future” Earth Science Reviews. Volumen 89, p. 79-96.
- Vuille, M. 2013. Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., and J. E. Sicart. 2001. Anomalous heat and mass balance budget of Glaciar Zongo, Bolivia, during the 1997/98, El Nino year, J. Glaciol.(47) 21–28 p.



- Wu, Y., He, J., Guo, Z. & A. Chen. 2014. Limitations in identifying the equilibrium-line altitude from the optical remote-sensing derived snowline in the Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*. Volume. 60: 224.
- WWF. Going, going, gone! Climate Change and Global Glacier Decline. Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/glacierspaper.pdf>
- Zorzetto, R. 2013. *Revista Pesquisa*. Thaw in the Andes. Aerial photos and satellite images show accelerated shrinking of South American glaciers. Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://revistapesquisa.fapesp.br/en/2013/05/15/thaw-in-the-andes/>

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: Cálculo de la ELA actual (2014)

GLACIAR	BR=1.0	BR=1.5	BR=2.0	BR=2.5	BR=3.0
1	5285	5277	5272	5267	5264
2	5347	5333	5323	5315	5309
3	5194	5185	5178	5173	5170
4	5177	5171	5168	5165	5163
5	5146	5139	5134	5130	5127
6	5284	5272	5264	5259	5254
7	5601	5605	5608	5610	5611
8	5391	5386	5382	5379	5377
9	5415	5404	5402	5405	5407
10	5502	5534	5528	5524	5520
11	5390	5377	5368	5362	5377
12	5302	5302	5304	5306	5306
13	5531	559	5510	5503	5501
14	5229	5211	5199	5206	5209
15	5249	5235	5225	5218	5213
16	5172	5153	5156	5160	5161
17	5124	5106	5103	5108	5110
18	5095	5085	5077	5072	5068
19	5556	5565	5568	5569	5570
20	5465	5462	5466	5468	5469
21	5276	5256	5255	5259	5262
22	5548	5524	5508	5502	5508
23	5335	5311	5303	5309	5312
24	5272	5258	5251	5256	5258
25	5222	5209	5201	5203	5206
26	5151	5155	5158	5160	5160
27	5139	5126	5117	5111	5106

*Continuación*

28	5119	5102	5109	5112	5114
29	5172	5151	5160	5163	5164
30	5063	5051	5054	5057	5059
31	5132	5110	5104	5109	5112
32	5204	5209	5213	5215	5216
33	5238	5220	5207	5201	5206
34	5253	5257	5260	5262	5263
35	5041	5006	5009	5014	5015
36	5373	5351	5360	5363	5365
37	5233	5215	5203	5204	5208
38	5141	5117	5101	5107	5110
39	5103	5114	5117	5118	5119
40	5109	5110	5114	5116	5117
41	5068	5058	5051	5052	5055
42	5030	5015	5006	5000	5003
43	4911	4902	4903	4906	4907
44	4956	4960	4964	4965	4966
45	5046	5016	5003	5010	5013
46	4964	4955	4961	5010	5013
47	5091	5055	5061	5065	5066
48	5139	5109	5108	5113	5115
49	5240	5217	5201	5206	5210
50	5220	5209	5202	5201	5204
51	5372	5361	5354	5350	5354
52	5421	5409	5401	5403	5405
53	5559	5554	5559	5561	5562
54	5353	5356	5359	5361	5362
55	5126	5117	5110	5105	5102
56	5154	5154	5157	5159	5160
57	5235	5216	5203	5204	5208
58	5270	5253	5255	5259	5261
59	5168	5158	5164	5166	5167
60	5236	5222	5212	5205	5200
61	5074	5055	5054	5058	5061
62	5336	5307	5308	5313	5315
63	5407	5406	5410	5412	5413
64	5505	5508	5512	5514	5515
65	5364	5354	5352	5355	5357
66	5848	5834	5825	5817	582
67	5786	5758	5756	5761	5763

*Continuación*

68	5006	5009	5013	5015	5016
69	5141	5115	5102	5109	5112
70	5508	5506	5510	5512	5514
71	5363	5361	5366	5367	5368
72	5389	5357	5366	5368	5369
73	5216	5204	5210	5213	5214
74	5152	5157	5160	5161	5162
75	5238	5206	5209	5213	5215
76	5247	5211	5207	5213	5215
77	5188	5165	5150	5157	5160
78	5718	5710	5705	5701	5700
79	5754	5751	5754	5755	5756
<b>PROMEDIO</b>	<b>5271</b>	<b>5196</b>	<b>5256</b>	<b>5258</b>	<b>5192</b>
<b>DESV.EST.</b>	<b>192.72</b>	<b>562.42</b>	<b>195.02</b>	<b>193.25</b>	<b>556.15</b>

Hoja de cálculo en Excel en la cual se presentan las ELAs calculadas para cada glaciar con diferentes valores de BR. En la parte inferior de la tabla se muestra el promedio y la desviación estándar del conjunto de glaciares. La ELA final para la cuenca será aquella con la menor desviación estándar (Osmaston, 2005). El mismo procedimiento se repite para calcular las ELAs del año 1962.

**ANEXO 2: Cálculo de la ELA para el año 1962**

<b>GLACIAR</b>	<b>BR=1.0</b>	<b>BR=1.5</b>	<b>BR=2.0</b>	<b>BR=2.5</b>	<b>BR=3.0</b>
1	5220	5204	5204	5208	5210
2	5212	5208	5213	5215	5216
3	5341	5322	5309	5300	5305
4	5145	5127	5114	5104	5102
5	5099	5079	5066	5057	5050
6	5036	5024	5015	5010	5005
7	5382	5358	5365	5367	5368
8	5340	5302	5312	5315	5317
9	5237	5218	5206	5202	5206
10	5189	5175	5176	5160	5155
11	5088	5071	5060	5051	5054
12	5111	5107	5112	5114	5115
13	5045	5031	5022	5015	5010
14	4875	4863	4868	4869	4870
15	5284	5276	5271	5267	5264
16	5349	5335	5326	5318	5312
17	5194	5185	5179	5174	5170
18	5003	5006	5010	5011	5012
19	5215	5201	5206	5209	5210
20	5598	5587	5579	5572	5567
21	5327	5313	5303	5302	5306
22	5207	5208	5213	5214	5215
23	5224	5207	5214	5216	5217
24	5086	5068	5057	5050	5054
25	5311	5315	5318	5319	5320
26	4972	4958	4951	4956	4958
27	4974	4954	4956	4960	4962
28	5247	5223	5205	5205	5210
29	5483	5460	5466	5468	5469
30	5133	5110	5103	5109	5112
31	5002	5013	5017	5018	5018
32	5372	5351	5360	5363	5365
33	4964	4955	4961	4963	4965
34	5183	5159	5154	5159	5162
35	5282	5254	5259	5263	5265

*Continuación*

36	5214	5206	5211	5214	5215
37	5355	5360	5364	5366	5367
38	4750	4764	4767	4768	4769
39	5318	5305	5311	5314	5315
40	5100	5110	5113	5114	5115
41	5169	5154	5161	5163	5164
42	5201	5210	5213	5215	5216
43	5255	5256	5260	5262	5263
44	5231	5213	5201	5205	5209
45	5224	5204	5207	5211	5213
46	5432	5426	5422	5419	5417
47	5138	5114	5101	5108	5111
48	5065	5061	5065	5067	5068
49	5088	5058	5058	5063	5065
50	4934	4912	4918	4919	4920
51	5441	5413	5405	5411	5414
52	5520	5500	5508	5511	5513
53	5128	5103	5108	5112	5114
54	5798	5773	5755	5755	5759
55	5313	5313	5317	5318	5319
56	5196	5172	5157	5153	5158
57	5153	5163	5166	5168	5168
58	5169	5153	5161	5163	5165
59	5379	5364	5355	5351	5355
60	4378	4370	4364	4360	4358
61	4522	4515	4510	4506	4503
62	5261	5251	5256	5259	5260
63	5364	5354	5352	5355	5357
64	4989	4952	4962	4965	4967
<b>PROMEDIO</b>	5185	5172	<b>5170</b>	5170	5171
<b>DESV.EST.</b>	219.56	217.30	<b>216.94</b>	217.33	217.85

**ANEXO 3: Área de estudio.**



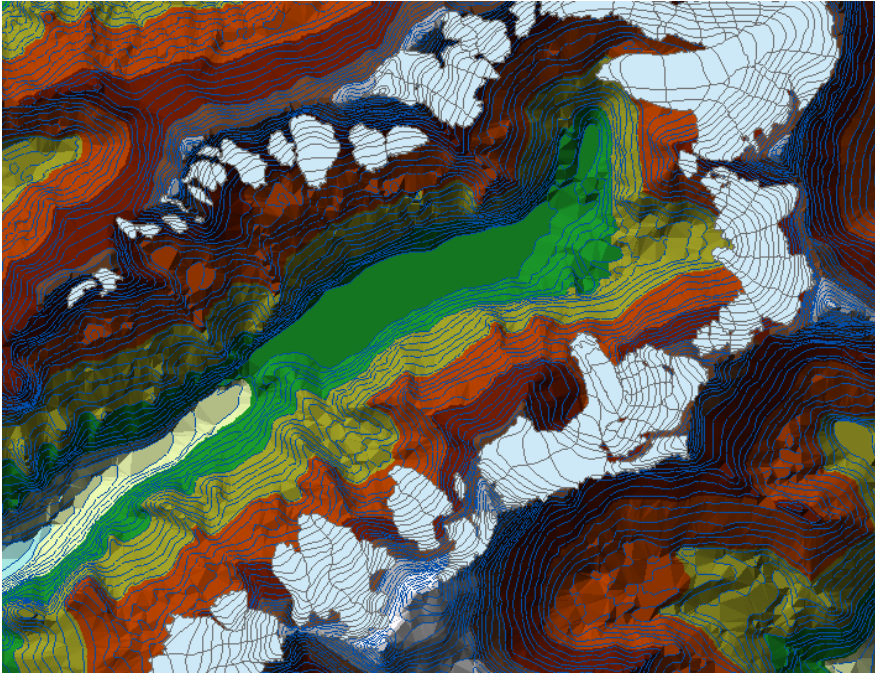
Parque Nacional Huascarán- Ancash



Cuenca de la Laguna Parón- Parque Nacional Huascarán



#### ANEXO 4: Modelo de elevación digital de la cuenca Parón



La figura muestra el modelo de elevación digital de la cuenca de Parón, indicando con diferentes colores las diferentes bandas altitudinales.

En la figura los glaciares están dibujados con polígonos celestes. También se muestran las curvas de nivel de la cuenca que fueron utilizadas para recortar cada glaciar cada 50 metros de desnivel. Este mismo proceso se repite para realizar un DEM de los glaciares del año 1962.



### ANEXO 5: Cálculo de la ELA de cada glaciar

GLACIAR	Equidistancia (m)	Intervalos Z	Z media	Area	Z media x Area	Balance Ratio (BR) *	ELA Referencial Contour (1)**	Belt area x Alt above ref. contour(1)	Area x Alt x Balance Ratio for contour(1)	ELA Referencial Contour(2)	Belt area x Alt above ref. contour(2)	Area x Alt x Balance Ratio for contour(2)
GL 3	50.0		51	9391	481759	2.5	4750	35685	35685	4800	30990	30990
			30	.02	32.6			88	88		37	37
			51	1147	594053			48787	48787		43047	43047
			75	9.3	77.5			03	03		38	38
			52	1149	600608			54600	54600		48853	48853
			25	4.9	52.5			78	78		33	33
			52	8020	421389			40422	40422		36412	36412
			54	.35	18.9			56	56		39	39
TOTA			4038	209781			17949	17949		15930	15930	
LS			5.6	081.5			624	624		346	346	

#### RESULTS

AA ELA (median alt x area, shortcut method) =

**5194**

CHECK VERDADER

= O

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

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

AABR ELA for other BRs (if exact contour) =

AABR ELA for other BRs (interpolated between contours) =

AABR ELA		BR=1.0	BR=1.5	BR=2.0	BR=2.5	BR=3.0
GL 3	for	5194	5185	5178	5173	5170

Con estos datos se procedió al cálculo de la ELA, el cual sería el set de datos con menor desviación estándar (Osmaston, 2005).

## ANEXO 6: Fotografías del área de estudio



Circo glaciar del nevado Artesonraju (izquierda) y Pirámide (derecha).



Vista del nevado Artesonraju, Pirámide Garcilaso y Chacaraju desde la zona de campamento.



Laguna Parón y nevado Pirámide Garcilaso.





Nevado Artesonraju.