

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA, INDUSTRIAS ALIMENTARIAS  
y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



“Impacto de la Variación de Temperatura en la Desglaciación de la Cordillera  
Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)”

TESIS

Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Presentado por el Bachiller:

GRANADOS ALEGRE, HAROL EDWARD

Asesor:

Ing. LUIS MIGUEL CHÁVEZ BARBERY

HUACHO – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA, INDUSTRIAS ALIMENTARIAS  
y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



“Impacto de la Variación de Temperatura en la Desglaciación de la Cordillera  
Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)”

TESIS

Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Presentado por el Bachiller:

GRANADOS ALEGRE, HAROL EDWARD

JURADO EVALUADOR:

---

Dr. José Vicente Nunja García

Presidente

---

Ing. Jesús Gustavo Barreto Meza

Secretario

---

Mg. Sc. Eroncio Mendoza Nieto

Vocal

---

Ing. Luis Miguel Chávez Barbery

Asesor

**Dedicatoria:**

*A mi madre Maria Alegre y mi hermano Kevin Granados, que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, valentía y de no temer las adversidades.*

***Harol Edward Granados Alegre***

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre y hermano, quienes son mi motor y mi mayor inspiración.*

*Al Proyecto CRYOPERU INGEMMET-CIENCIACTIVA 144-2015, por incentivar me a realizar esta investigación.*

*De manera especial y sincera al Dr. Jose Úbeda Palenque, investigador principal del Proyecto, por su confianza al aceptarme como tesista del Proyecto.*

*Al Ing. Ronald Fernando Concha Niño De Guzmán, coinvestigador del Proyecto, por compartir su tiempo y sus conocimientos con paciencia, entusiasmo y gran motivación.*

*Al Ing. Pool Vásquez, Joshua Iparraguirre, Gonzalo Luna, Igor Astete y Fiorela Inocente, gran equipo de investigadores y tesistas del Proyecto, por sus aportes, motivación y anécdotas compartidas.*

*Personas maravillosas que admiro y quienes hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.*

***Harol Edward Granados Alegre***

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. Descripción de la realidad problemática.	15
1.2. Formulación del problema	16
1.2.1. Problema General	16
1.2.2. Problemas Específicos.	16
1.3. Objetivos de la investigación	16
1.3.1. Objetivo general.	16
1.3.2. Objetivos específicos.	16
1.4. Justificación de la Investigación	17
1.5. Delimitación del estudio	17
1.6. Viabilidad del estudio	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la Investigación	19
2.2. Bases Teóricas	21
2.2.1. Geomorfología glaciar	21
2.2.2. Glaciares de los Andes Tropicales	25
2.2.3. Área de Estudio	26
2.2.4. Estimaciones de las Altitudes de la Línea de Equilibrio de un glaciar	29
2.2.5. Balance de Masa Glaciar	31

2.2.6. Cronología glaciario y la Pequeña Edad de Hielo (PEH)	32
2.2.7. Reconstrucción de los eventos climáticos pasados	34
2.2.8. Reconstrucción de Volumen y Superficie de Paleo-glaciares	36
2.2.9. Modelado de la topografía del lecho glaciario	37
2.2.10. Impacto del Aumento de la Temperatura Media Mundial	38
2.2.11. Retroceso Glaciario en Regiones de los Andes de Tropicales	39
2.3. Definiciones conceptuales	42
2.4. Formulación de la Hipótesis	45
2.4.1. Hipótesis General	45
2.4.2. Hipótesis Específicas	45
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	46
3.1. Diseño Metodológico	46
3.1.1. Tipo de Investigación	46
3.1.2. Nivel de Investigación	46
3.1.3. Diseño	46
3.1.4. Enfoque	46
3.2. Población y Muestra	46
3.3. Operacionalización de Variables e Indicadores	46
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	47
3.4.1. Técnicas a emplear	47
3.4.2. Descripción de los instrumentos	69
3.5. Técnicas para el procesamiento de la información	70
3.5.1. Cartografía y medida de la superficie de los glaciares del año 2017	70
3.5.2. Cartografía de los glaciares del año 1962	72
3.5.3. Cartografía de los glaciares de la PEH (Paleoglaciares)	74
3.5.4. Cálculo volumétrico glaciario del año 2017 y la estimación del lecho basal	75
3.5.5. Reconstrucción volumétrica glaciario del año 1962.	81

3.5.6. Reconstrucción volumétrica glaciar de la PEH.	87
3.5.7. Cálculo de la ELA del año 2017, 1962 y PEH	93
3.5.8. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100	96
3.5.9. Estimación de la variación de la temperatura	98
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	100
4.1. Cartografía y estimación del área glaciar para la PEH, el año de 1962 y 2017	100
4.2. Estimación del volumen glaciar para la PEH, el año de 1962 y 2017	114
4.3. Estimación de la ELA de la PEH, el año 1962 y el 2017	121
4.4. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100	132
4.5. Estimación de la variación temperatura registradas por la evolución glaciar	133
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134
5.1. Discusión	134
5.1.1. Variación de la superficie glaciar	134
5.1.2. Variación del volumen glaciar	139
5.1.3. Variación de la ELA en la cordillera Huayhuash	146
5.1.4. Variación de la ELA en los Andes Centrales	154
5.1.5. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA	156
5.1.6. Variación de la temperatura registradas por la evolución glaciar	158
5.2. Conclusiones	165
5.3. Recomendaciones	166
CAPÍTULO VI. FUENTES DE INFORMACIÓN	167
6.1. Fuentes bibliográficas	167
ANEXOS	175

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	47
Tabla 2. Puntos de control o coordenadas dentro del perfil topográfico de 1962 exportados desde el ArcGIS. ....	84
Tabla 3. Puntos Adicionales para el perfil topográfico de 1962.....	85
Tabla 4. Altura máxima y mínimo del perfil topográfico de 1962 .....	86
Tabla 5. Puntos de control o coordenadas del perfil topográfico de la PEH exportados desde el ArcGIS. ....	90
Tabla 6. Puntos adicionales del perfil topográfico de la PEH .....	91
Tabla 7. Altura máxima y mínima del perfil topográfico de la PEH.....	92
Tabla 8. Tabla de distribución para el cálculo de la regresión cuadrática .....	97
Tabla 9. Glaciares extintos, fragmentados y generados por periodo .....	102
Tabla 10. Detalle de las áreas de glaciares del sector Alto Marañón en los 3 periodos .....	108
Tabla 11. Detalle de las áreas de glaciares del sector Rapay en los 3 periodos.....	109
Tabla 12. Detalle de las áreas de glaciares del sector Achin en los 3 periodos .....	110
Tabla 13. Distribución del área glaciar de la Cordillera Huayhuash por sector y periodo ....	111
Tabla 14. Evolución del área glaciar de la Cordillera Huayhuash.....	112
Tabla 15. Detalle el volumen de los glaciares del sector Alto Marañón en los 3 periodos ...	115
Tabla 16. Detalle el volumen de los glaciares del sector Rapay en los 3 periodos .....	116
Tabla 17. Detalle el volumen de los glaciares del sector Achin en los 3 periodos.....	117
Tabla 18. Distribución del volumen glaciar de la Cordillera Huayhuash por sector y periodo .....	118
Tabla 19. Evolución del volumen glaciar de la Cordillera Huayhuash .....	119
Tabla 20. Resultados de la estimación de la ELA en la PEH por sector .....	122
Tabla 21. Resultados de la estimación de la ELA en 1962 por sector.....	123
Tabla 22. Resultados de la estimación de la ELA en el 2017 por sector.....	124



Tabla 23. Resultados de la estimación de la ELA de la cordillera por periodo.....	125
Tabla 24. Resumen de ELAs por sector y periodo .....	127
Tabla 25. Tabla desarrollada de distribución de datos para la estimación de la ELA .....	132
Tabla 26. Resumen de ELAs y paleo-ELAs y su variación de temperatura ( $\Delta T$ ).....	133
Tabla 27. Comparación con los resultados del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas del ANA, UGRH (2014) .....	135
Tabla 28. Comparación con los resultados del Inventario de glaciares del INAIGEM (2018) .....	136
Tabla 29. Comparación de la superficie glaciar con otros estudios a fines .....	137
Tabla 30. Pérdida de la superficie glaciar con respecto a la PEH.....	139
Tabla 31. Comparación de los resultados de pérdida del volumen glaciar con estudios afines .....	141
Tabla 32. Pérdida del volumen glaciar con respecto a la PEH .....	143
Tabla 33. Estimación de la duración de la reserva de agua de la cordillera Huayhuash .....	144
Tabla 34. Comparación de la variación de la superficie y volumen glaciar .....	145
Tabla 35. Comparación del ascenso de la ELA en los periodos PEH-1962 y 1962-2017.....	147
Tabla 36. Cotas máximas y mínimas según periodo.....	149
Tabla 37. Glaciares condenados a desaparecer en cada periodo por encontrarse debajo de la ELA.....	150
Tabla 38. Comparación de la ELA obtenida con otros resultados.....	155
Tabla 39. Comparación con otros resultados ordenados de Este a Oeste (Longitud).....	155
Tabla 40. Temperatura promedio de Cajatambo (2014-2018).....	161
Tabla 41. Media de Temperaturas registradas en la estación “Oyón” .....	162
Tabla 42. Comparación de las variaciones de temperatura obtenidas con los de otros estudios .....	163
Tabla 43. Comparación de las variaciones de temperaturas regionales con los registros del IPCC.....	164

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la cordillera Huayhuash (Hall et al.,2009). .....	27
Figura 2. Área de estudio, cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco). .....	28
Figura 3. Altitud de la línea de equilibrio (ELA).....	30
Figura 4. Cartografiado de los Glaciares del 2017 con la herramienta Polígono en Google Earth Pro. ....	48
Figura 5. Imágenes Aéreas de la Cordillera Huayhuash en el año 1962. ....	49
Figura 6. Identificación de los glaciares de la PEH a partir de cordones morrénicos. ....	50
Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología GLABTOP. (Linsbauer et. al.,2012) .....	51
Figura 8. Parámetros utilizados en la metodología GLABTOP. ....	60
Figura 9. Herramientas GLARE (Pellitero et al., 2016). ....	61
Figura 10. Diagrama que muestra el uso del GLARE. ....	62
Figura 11. Herramientas del ELA_Calculation. ....	67
Figura 12. Archivo de texto con valores de las ELAs (Izquierda), Herramienta ELA-AABR (Derecha).....	68
Figura 13. Cartografía de los glaciares de la cordillera de Huayhuash 2017. ....	71
Figura 14. Proceso de georreferenciación de las Imágenes Satelitales de 1962.....	72
Figura 15. (A) Fotografía Satelital del 17 de junio del año 2017 de la cordillera Huayhuash. (B) Fotografías Georreferenciadas del año 1962.....	73
Figura 16. Cartografía de los glaciares de la cordillera de Huayhuash 1962. ....	74
Figura 17. Cartografía de la Pequeña Edad de Hielo de la cordillera Huayhuash.....	75
Figura 18. Mapa de Pendientes con los glaciares contorneados.....	76
Figura 19. Puntos centrales de los segmentos de las Branch Line intersecados por las curvas de nivel de 50 m de intervalo dentro del glaciar.....	77
Figura 20. Puntos rojos son los espesores centrales y los puntos morados son los espesores continuos interpolados para el cálculo del volumen glaciar. ....	80

Figura 21. FlowLine en glaciares del año 1962.....	81
Figura 22. Perfil topográfico dentro de la cartografía de la cordillera Huayhuash del año 1962. .....	83
Figura 23. Figura geométrica cerrada del perfil topográfico de 1962. ....	85
Figura 24. Perímetro de la sección transversal del perfil topográfico de 1962.....	86
Figura 25. Flow line de la PEH en la cordillera Huayhuash.....	88
Figura 26. Perfil topográfico dentro de la cartografía de la cordillera Huayhuash de la PEH	89
Figura 27. Figura geométrica cerrada del perfil topográfico de la PEH.....	91
Figura 28. Perímetro de la sección transversal del perfil topográfico de la PEH. ....	92
Figura 29. Función AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios con los datos de entrada y salida. ....	93
Figura 30. Block de Notas de resultados de la función AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios para el año 2017 (A), 1962 (B) y la PEH (C).....	94
Figura 31. ELAs correspondientes a los glaciares de la PEH (A), del año 1962 (B) y 2017(C). .....	95
Figura 32. Hoja de Cálculo Excel aplicando la ecuación propuesta por Úbeda (2011). ....	99
Figura 33. Cordillera Huayhuash distribuida por sectores.....	100
Figura 34. Glaciares en la PEH, 1962 y 2017 por sector.....	101
Figura 35. Gráfico que muestra el número de paleo-glaciares y glaciares para cada sector en los diferentes periodos. ....	102
Figura 36. Proceso de extinción glaciar de la cordillera Huayhuash desde la PEH a 1962...	103
Figura 37. Proceso de extinción glaciar de la cordillera Huayhuash, desde 1962 al 2017....	104
Figura 38. Gráfico que muestra el proceso de extinción, fragmentación y generación de glaciares en la cordillera Huayhuash.....	105
Figura 39. Proceso de fragmentación glaciar desde la PEH a 1962. ....	106
Figura 40. Proceso de fragmentación glaciar desde 1962 al 2017.....	107

Figura 41. Muestra la representatividad de cada sector en la Cordillera respecto al área de masa glaciar en los periodos PEH, 1962 y el 2017. ....	112
Figura 42. Área glaciar dela cordillera Huayhuash por cada periodo.....	113
Figura 43. Proporción de pérdida de área glaciar por sector. ....	113
Figura 44. Representatividad (%) del volumen por sector en cada periodo. ....	119
Figura 45. Volumen glaciar dela cordillera Huayhuash por cada periodo. ....	120
Figura 46. Proporción del volumen glaciar perdido de cada sector en cada intervalo de tiempo. ....	120
Figura 47. Isohipsas que representan las ELAs por periodo (Vista desde el Sector Alto Marañón). ....	121
Figura 48. Desnivel de ELA por sector. ....	127
Figura 49. Variación de las ELAs en cada periodo. ....	128
Figura 50. Desnivel de la ELA desde la PEH hasta el año 2017. ....	128
Figura 51. Variación de la ELA en el sector Alto Marañón en los 3 periodos.....	129
Figura 52. Variación de la ELA en el sector Rapay en los 3 periodos. ....	130
Figura 53. Variación de la ELA en el sector Achin en los 3 periodos.....	131
Figura 54. Comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100.....	133
Figura 55. Comparación de las proporciones del área glaciar perdida con respecto a su área en la PEH. ....	138
Figura 56. Distribución de trabajos afines en reconstruccion volumétrica.....	142
Figura 57. Comparación de las proporciones del volumen glaciar perdido con respecto a su volumen en la PEH.....	142
Figura 58. ELAs de los sectores de la cordillera Huayhuash por periodos. ....	148
Figura 59. Relación de la tendencia de la ELA con el Volumen Glaciar .....	148
Figura 60. Glaciares condenados a desaparecer por estar por debajo de la ELA en el año 2017. ....	151

Figura 61. Resultados comparativos de la ELA con resultados de Inocente & Gonzales, (2017) en la cordillera Huayhuash.....	152
Figura 62. Cotas resultantes de la investigación de Inocente y Gonzales (2017) comparadas con las encontradas en la actual investigación.....	153
Figura 63. Resultados de las ELAs ordenados por su longitud (Este a Oeste).....	156
Figura 64. Área de acumulación según las predicciones de la ELA para el 2050 y 2100.....	157
Figura 65. Especies amenazadas de fauna silvestre en la cordillera Huayhuash. ....	160
Figura 66. Precipitación, Temperatura máxima, mínima y promedio de la región aledaña estudiada (Oyón).....	162
Figura 67. Recorrido desde la ciudad de Huacho a Queropalca (Prov.- Lauricocha – Dep. Huánuco).....	176
Figura 68. Ruta de acceso al lado oeste de la cordillera Huayhuash desde Queropalca.....	176
Figura 69. Plazuela de Queropalca-Lauricocha-Huánuco, punto de partida. ....	177
Figura 70. Vista de la cordillera Huayhuash a la salida de Queropalca (6:00 am).....	177
Figura 71. Ascenso por camino de herradura hacia la cordillera Huayhuash.....	178
Figura 72. Vista de la cordillera Huayhuash, primera parada (Quishuarcancha). ....	178
Figura 73. A 20m de la laguna Siula (Quishuarcancha). ....	179
Figura 74. Laguna Siula y vista frontal de la cordillera Huayhuash.....	179
Figura 75. Laguna Grangajanca. ....	180
Figura 76. Cordón morrénico de la laguna Grangajanca. ....	180

“Impacto de la Variación de Temperatura en la Deglaciación de la Cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)”

"Impact of Temperature Variation on the Deglaciation of the Cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)"

Harol Edward Granados Alegre<sup>1</sup>, Luis Miguel Chávez Barbery<sup>2</sup>

## RESUMEN

**Objetivo:** Analizar el impacto de la variación de temperatura y su relación con la deglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017. **Método:** A partir de un análisis geomorfológico usando imágenes satelitales y fotografías aéreas, se cartografían los límites de los glaciares actuales, de 1962 y de la Pequeña Edad de Hielo. A continuación, se estima el volumen de los glaciares actuales mediante la metodología GLABTOP para calcular el lecho basal, del cual se genera la reconstrucción volumétrica por la herramienta GlaRE y para la estimación de la Altitud de la Línea de Equilibrio glaciario y paleo-glaciario, se utilizó la herramienta ELA\_Calculation. Finalmente se estima la variación de la temperatura registrada por la evolución de los glaciares mediante el producto de la diferencia calculada de la Altitud de la Línea de Equilibrio por el Gradiente Térmico Vertical medio (0.0065 grados Celsius por metro) de la Tierra. **Resultados:** Se han identificado 82 glaciares actuales, con un volumen total de 1,207.643 millones de metros cúbicos, 84 glaciares en 1962 con 2,731.087 millones de metros cúbicos y 72 paleoglaciares con 4,898.731 millones de metros cúbicos. La estimación de la Altitud de la Línea de Equilibrio fue de 5209 metros sobre el nivel del mar para el 2017, 5112 para el año 1962 y 5004 para la Pequeña Edad de Hielo. La variación de la temperatura hallada es de 1,333 grados Celsius. **Conclusión:** La estimación de la deglaciación en la cordillera Huayhuash desde la Pequeña Edad de Hielo al año 2017, es de 30.823 kilómetros cuadrados, lo que representa un 47.21% de superficie glaciario perdida; además, se calcula en 3,691.089 millones de metros cúbicos el volumen de glaciario perdido, que representa un 75.35%; y un desnivel de la Altitud de la Línea de Equilibrio de 205 metros, que sugiere un incremento de la temperatura de 1,333 grados Celsius. **Recomendación:** Realizar estimaciones de precipitación.

**Palabras clave:** Deglaciación, morrenas, altitud de línea de equilibrio glaciario, gradiente térmico vertical.

- 
1. Tesista. Facultad de Ingeniería Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.
  2. Asesor. Facultad de Ingeniería Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

## ABSTRACT

**Objective:** To analyze the impact of the variation of the temperature and its relation with the deglaciation of the Huayhuash mountain range (Lima-Áncash-Huánuco) in the Little Ice Age (16th to 19th centuries), in the year of 1962 and in 2017. **Method:** From a geomorphological analysis using satellite images and aerial photographs, the boundaries of the current glaciers, of 1962 and of the Little Ice Age are mapped. Then, the volume of the current glaciers is estimated using the GLABTOP methodology to calculate the basal bed, from which the volumetric reconstruction is generated by the GlaRe tool, and for the estimation of the Glacier and Paleo-Glacier Equilibrium-Line Altitude, the ELA\_Calculation tool was used. Finally, the variation of the temperature recorded by the evolution of the glaciers is estimated by the product of the calculated difference of the Equilibrium-Line Altitude by the vertical thermal gradient (0.0065 degrees Celsius per meter) of the Earth. **Results:** 82 current glaciers have been identified, with a total volume of 1,207,643 million cubic meters, 84 glaciers in 1962 with 2,731,087 million cubic meters and 72 paleoglaciers with 4,898,731 million cubic meters. The Equilibrium-Line Altitude estimate was 5209 meters for 2017, 5112 meters for 1962 and 5004 meters for the Little Ice Age. The variation of the temperature found is 1,333 degrees Celsius. **Conclusion:** The estimate of deglaciation in the Huayhuash mountain range from the Little Ice Age to the year 2017 is 30,823 square kilometers, which represents 47.21% of lost glacier surface; in addition, the volume of lost glacier is estimated at 3,691,089 million cubic meters, which represents 75.35%; and an altitude difference of the Equilibrium-Line Altitude of 205 meters, which suggests an increase in temperature of 1,333 degrees Celsius. **Recommendation:** Perform precipitation estimates.

**Keywords:** deglaciation, moraines, glacier Equilibrium-Line Altitude, vertical thermal gradient.

## INTRODUCCIÓN

La Cordillera Huayhuash ( $10^{\circ}12'$  -  $10^{\circ}27'$  de latitud sur y  $76^{\circ}52'$  -  $77^{\circ}00'$  de longitud oeste), alberga extensas masas de hielo y morrenas muy bien conservadas cercanas al frente glaciar actual, que permiten delimitar la máxima expansión cuando los glaciares avanzaron por última vez. Dataciones liquenométricas en valles cercanos permiten suponer que dichos avances ocurrieron en la Pequeña Edad del Hielo (PEH), último periodo frío globalmente reconocido. En los Andes Centrales, este periodo tuvo lugar entre los años  $\sim 1500$  y  $1850-1890$ , según indican los isótopos de oxígeno en testigos de hielo del glaciar Quelccaya (Thompson et al., 1986).

La metodológica que se presenta se fundamenta en la evolución de los glaciares como indicadores sensibles de la variación de temperatura, el parámetro que mejor expresa la relación es la *Equilibrium Line Altitude* (ELA-altitud de la línea de equilibrio), una isohipsa que divide teóricamente la zona de acumulación, donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa y la zona de ablación, donde los fenómenos de fusión y sublimación provocan pérdidas de masa. Es decir, la elevación de la ELA encima de un glaciar provocaría la desaparición de la zona de acumulación: y desaparecerá en el tiempo que las condiciones climáticas necesiten para fundirla.

Mediante el análisis de las ELAs y paleo-ELAs, se puede comparar la variación de este parámetro en los años 2017, 1962 y en la PEH, para luego extrapolar su tendencia hacia el futuro. De esta manera se obtendrá un eficaz instrumento de análisis del impacto de la variación de la temperatura en los glaciares basado en un mapeo detallado, este trabajo muestra los resultados de la estimación de las superficies y volúmenes glaciares, así como el cálculo de la ELA en glaciares y paleo-glaciares.



## CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la realidad problemática.

Los glaciares constituyen la reserva más grande de agua dulce en el planeta y la segunda reserva de agua luego de los océanos. El 71% de los glaciares tropicales de Sudamérica se encuentran en el Perú distribuidos en 19 cordilleras nevadas, el derretimiento de estos glaciares es fuente principal de agua que aporta a la disponibilidad hídrica en las cuencas Andinas. Sin embargo, estos glaciares vienen experimentando un retroceso estrechamente vinculado al cambio climático global, siendo más que un hecho limitado a los Andes o a las zonas tropicales, una tendencia que afecta a todos los glaciares de montaña del mundo en magnitudes diferentes.

Desde el año 1932 a la fecha, han desaparecido áreas nevadas que alcanzan en algunos casos a un kilómetro y medio de extensión. Para el periodo de 1980 al 2006, se ha observado una disminución del área glaciar en las tres zonas evaluadas: Cordillera Blanca (Ancash), nevado Coropuna (Arequipa) y nevado Salcantay (Cusco). Asimismo, se aprecia en la última década un incremento de dicha tendencia (Giráldez, 2011; Úbeda, 2011; Concha, 2015).

Realizar estudios de glaciares y conocer su dinámica cobra mayor importancia e interés, por su significado ambiental; no solo como elemento individual en vías de extinción, sino también por su importante valor como indicadores del clima que permiten evaluar y analizar el cambio climático. Por lo cual, el presente proyecto tiene por finalidad ensayar una propuesta metodológica que complemente mediante análisis de gabinete las tareas de monitoreo, por lo que se ha escogido como área de estudio los glaciares de la cordillera Huayhuash ubicado en los límites de los departamentos de Lima, Ancash y Huánuco, de las que se analizaran datos correspondientes a tres periodos, la Pequeña Edad de Hielo (PEH), el año 1962 y 2017.

La propuesta metodológica que se presenta se fundamenta en la evolución de los glaciares como indicadores sensibles de la variación de temperatura, el parámetro que mejor expresa la relación es la *Equilibrium Line Altitude* (ELA-altitud de la línea de equilibrio).

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cómo el impacto de la variación de temperatura se relaciona con la desglaciación en la cordillera Huayhuash en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?

### **1.2.2. Problemas Específicos.**

- Problema Específico 1:

¿De qué manera la variación de temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona con la variación de la superficie y volumen glaciar en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?

- Problema Específico 2:

¿De qué manera la variación de temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona con la variación de la ELA en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general.**

Analizar el impacto de la variación de temperatura y su relación con la desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Objetivo Específico 1:

Analizar la variación de la temperatura en grados Celsius (°C) y su relación con la variación de la superficie y volumen glaciar en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

- Objetivo Específico 2:

Analizar la variación de la temperatura en grados Celsius (°C) y su relación con la variación de la ELA en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

#### **1.4. Justificación de la Investigación**

La desglaciación es uno de los efectos más visibles del cambio climático y van asociados con la alteración del régimen hídrico y la disponibilidad del agua para el uso agropecuario, doméstico e industrial. Estudios realizados demuestran que la desglaciación es un fenómeno que se extiende en toda la cordillera andina siendo más evidente en los glaciares tropicales. Esto exige evaluar de forma sistemática el estado de estos glaciares para entender su dinámica y los procesos geomorfológicos regionales.

Este trabajo de investigación se justifica por el interés y la importancia que tienen los glaciares tropicales de la Cordillera Huayhuash como indicadores sensibles al cambio de climático en diferentes periodos de tiempo (Pequeña Edad de Hielo, 1962 y 2017). A su vez se pretende contribuir al registro glacial del cambio climático en la geomorfología de la Cordillera. Así mismo, analizar el retroceso de los glaciares de la cordillera, porque constituyen una de las reservas de agua más importantes de la Sub Cuenca Rapay, Sub Cuenca Achin y la Inter-Cuenca Alto Marañón V (Unidad Hidrográfica 498999). Los resultados obtenidos en la presente investigación, servirá para poder compararlos con otros estudios realizados, de esta manera poder entender mejor la evolución glacial en los Andes peruanos y su impacto frente al Cambio Climático.

#### **1.5. Delimitación del estudio**

##### **1.5.1. Delimitación espacial**

El área de estudio del presente proyecto son los glaciares ubicados en la cordillera Huayhuash, localizado entre los límites de los departamentos de Lima, Ancash y Huánuco, se

extiende con una longitud aproximada de 26 km entre las coordenadas paralelas de 10° 12' - 10° 27' de latitud sur y 76° 52' - 77°00' de longitud oeste.

### **1.5.2. Delimitación temporal**

El análisis se realizó entre los meses de mayo 2018 a enero 2019.

## **1.6. Viabilidad del estudio**

### **1.6.1. Viabilidad Técnica**

Se cuenta con los equipos tecnológicos y características del software necesaria permitiendo que el programa de procesamiento de datos se ejecute sin presentar problemas.

Se cuenta con expertos relacionados a estudios glaciares gracias al proyecto CRYOPERU INGEMMET-CIENCIACTIVA 144-2015.

Se cuenta con la metodología aplicada a estudios similares con los cuales se realizará la verificación de los resultados.

El tema de investigación cuenta con suficiente acceso de información primaria tanto en internet, artículos, libros, etc.

### **1.6.2. Viabilidad Económica**

Los costos necesarios para el reconocimiento del área de estudio van por cuenta del investigador, siendo un monto accesible que no necesita un financiamiento mayor.

Los recursos utilizados, tales como imágenes satelitales, modelos digitales de elevación (DEM), fotografías aéreas, biblioteca especializada, capacitaciones, así como el asesoramiento externo van por cuenta del proyecto CRYOPERU INGEMMET-CIENCIACTIVA 144-2015.

### **1.6.3. Viabilidad Social**

Con la ejecución de esta investigación no se alterará ni causará daño alguno a un individuo, comunidad, ni ambiente; al contrario, tiene como finalidad dar a conocer una estimación del volumen, área y variación de la temperatura de los glaciares actuales, en 1962 y en la PEH para así llegar a una conclusión y entender mejor su dinámica con respecto al tiempo.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1.-En la vertiente suroeste del Nevado Yerupajá, se identificó mediante análisis geomorfológico 25 glaciares en el 2016 a partir de imágenes satelitales, con una superficie total de 6.3 km<sup>2</sup>, y 19 paleoglaciares a finales de la Pequeña Edad de Hielo (14 km<sup>2</sup>). Se reconstruyó la Línea de Equilibrio glaciar la cual se encontró a 5246 m.s.n.m. y la reconstrucción de la Línea de Equilibrio paleoglaciar a 5106 m.s.n.m. La variación de la temperatura hallada fue de 1,34°C. La estimación de desglaciación desde la Pequeña Edad de Hielo al año 2016, es del 55% con 7,7 km<sup>2</sup> de superficie glaciar perdida, extinción de 7 de sus glaciares y un promedio de masa glaciar perdida de 0,06 km<sup>2</sup>/año. Lo que ocasionó que el parámetro ELA (indicador sensible a la variación de la temperatura) presente un desnivel de 206 m al año 2016, incrementando en promedio 1,63 m/año respecto a la altitud. (Inocente & Gonzales, 2017)

2.1.2.- En la vertiente Sur Oeste del Nevado Hualcán, se hicieron estudios de cuatro Fases glaciales: Último máximo glaciar local (LLGM), Dryas más joven (YD), Pequeña Edad de Hielo (PEH) y las fluctuaciones glaciares modernas. La estimación del retroceso en los resultados fue de 41.6 km<sup>2</sup> desde el periodo frío (Dryas Reciente) hasta el año 2003, y de 3.1 km<sup>2</sup> (considerado desde el año de 1962) concluyendo en una tasa de desglaciación de 0.076 km<sup>2</sup> por año. Los resultados muestran que los ELA en el Sur Oeste del Nevado Hualcán están en algunos casos a solo 162 metros por debajo de los límites superiores de los glaciares, revelando etapas terminales rápidas de algunos de ellos. Se estimó que el cambio de temperatura de la PEH al año 2003 fue de 0.78 °Celsius (Giráldez, 2011).

2.1.3.- En los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa, los resultados muestran una Tasa de desglaciación de 1.295 m<sup>2</sup>/año pronosticando que: En un primer escenario, los glaciares que se delimitaron en el año de la investigación se perderían en su totalidad para el año 2099. En un segundo escenario, se indica que se perdería sólo el 50% de

los glaciares delimitados, sin embargo, este escenario se cumpliría si la temperatura se mantuviera constante. Por último, el resultado del enfriamiento del clima obtenido fue de 0.72 °C con respecto al año 2007 (Quirós, 2013).

2.1.4.- En los Nevados Salcantay y Huamantay, se calculó el área total de la cubierta glaciaria para el año 2014 y para la Pequeña Edad de Hielo siendo 10.17 km<sup>2</sup> con 79 glaciares y 24.53 km<sup>2</sup> con 23 paleoglaciares respectivamente. La ELA el año 2014, tiene un valor de 5143 m, mientras que el valor para la PEH es de 4847 m (Concha, 2015).

2.1.5.- Se realizó el Inventario de glaciares y lagunas de las 19 cordilleras nevadas del Perú, y muestran un total de 2679 glaciares con una superficie de 1298.59 km<sup>2</sup>. Las cordilleras con mayor cantidad de glaciares y superficie glaciaria son: La Cordillera Blanca en los Andes del Norte, con 755 glaciares y 527,62 km<sup>2</sup>, en los Andes del Centro la Cordillera Vilcanota con 374 glaciares y 279,40 km<sup>2</sup>; y la Cordillera Vilcabamba con 355 glaciares y una superficie de 129,15 km<sup>2</sup>. En general la altitud mínima de los glaciares inventariados se encuentra sobre los 4 000 m.s.n.m. La cordillera Huayhuash cuenta con 144 glaciares y con 55.27 km<sup>2</sup> de superficie glaciaria (ANA, UGRH, 2014).

2.1.6.- Se realizó el Inventario Nacional de Glaciares donde se identificó que en la Cordillera Huayhuash la reducción del área glaciaria ha sido de 86.89 km<sup>2</sup> (1962) a 53.06 km<sup>2</sup> (2016), con una pérdida de 33.83 km<sup>2</sup> equivalente al 38.93%, en 54 años. Con una tasa de reducción de 0.64 km<sup>2</sup>/año; con esta tasa los glaciares de la cordillera desaparecerán hacia el año 2099 de continuar la tendencia actual. La población existente en el área de influencia de la cordillera se estima en 13,255 habitantes con una densidad poblacional de 11 habitantes por km<sup>2</sup>; con una tasa de crecimiento promedio anual de 0.73% (INAIGEM, 2018).

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Geomorfología glaciár.**

La geomorfología glaciár se desarrolla en altas latitudes y altitudes por la acumulación de nieve, la alternancia hielo-deshielo causando gelifracción o la acumulación de hielo en masa. Algunas geoformas se originan por deposición (p.e. morrenas), otras por erosión (p.e. circo glaciár). Algunas pueden reconocerse y mapearse como formas de terreno elementales (p.e. una morrena). Otras son tipos de modelado que constan de más de una clase de forma de terreno. Un valle glaciár, por ejemplo, puede contener diversos tipos de morrena (de fondo, lateral, frontal), superficies de rocas aborregadas, valles colgantes, lagunas, entre otros. Las formas nivales no son formas de terreno propiamente dichas, ya que están cubiertas de nieve (p.e. avalanchas de nieve) (Zinck, 2012).

El circo glaciár es una depresión semicircular o semielíptica, dominada por laderas de elevada pendiente y que está, o ha estado ocupada por hielo. Se denomina horns al pico piramidal originado por la coalescencia de varios circos glaciares. El fondo de valle glaciár es una forma producida por una masa de hielo canalizada, generalmente con perfil transversal en “U” y limitada por paredes de pendiente pronunciadas (vertiente de valle glaciár). Un glaciár colgado, es aquel glaciár en que la excavación producida por su masa ha sido menos que la del valle glaciár principal en que reposa, desemboca o desembocaba, quedando a una mayor altura (SIGTIERRAS, 2015).

Los lagos de origen glaciár son el resultado de la presión ejercida por las grandes masas de hielo sobre el terreno por el que discurrían, especialmente en las zonas en que se produce una disminución de la pendiente se generaron depresiones denominadas cubetas de sobreexcavación glaciár. El retroceso de las masas de hielo dejó al descubierto estas cubetas que se transformaron en áreas lacustres receptoras de aguas procedentes del deshielo de glaciares y normalmente encerradas por una morrena frontal. Las rocas aborregadas, son

montículos rocosos que presentan un perfil longitudinal asimétrico, con una vertiente de pendientes suaves frecuentemente pulida y estriada, y otra irregular y a menudo escarpada. Estas formas están originadas por el movimiento del hielo sobre ellas y son característicos del modelado de la erosión glacial (SIGTIERRAS, 2015).

Se llaman morrenas a sedimentos glaciares formados por till (sedimentos variados de origen glacial) y depósitos fluvioglaciares. El till no presenta estratificación y pueden estar formados por una gran variedad de tipos de rocas. Las morrenas se clasifican según su posición respecto al valle glacial (SIGTIERRAS, 2015):

- a) Morrenas frontales, son amplias llanuras cubiertas de till, a menudo ocupando los fondos de valle glacial.
- b) Morrenas laterales, originadas en el margen lateral del glacial, a menudo adosada a la vertiente del valle glacial.
- c) Morrenas frontales o en arco, originadas en el frente de un glacial; a veces llega a unirse con una morrena lateral, adquiriendo en planta una forma arqueada.

La rimaya es un tipo especial de grieta que suele formarse en los glaciares de circo y tiene una dirección transversal al movimiento por gravedad del glacial. Podría decirse que es una grieta que se forma en los puntos donde se separa la nieve del fondo del circo del hielo que todavía está bien adherido en la parte superior. Los eskeres son cordones de arena y grava, originados por canales fluviales de deshielo. Mientras que los kames son pequeñas colinas cónicas de grava y arena, originadas por sedimentación en cubetas de hielo y cavidades glaciares. Así mismo, las terrazas de kame, provienen de la acumulación de sedimentos provenientes de canales que discurren entre la pared de un valle glacial y el borde lateral de hielo y dan lugar a una superficie plana (SIGTIERRAS, 2015):



Para la geomorfología, la sobreexcavación glaciaria es un proceso erosivo de elevada complejidad y de funcionamiento permanente, cuya actividad se encuentra significativamente controlada por el caudal de la corriente puesta en movimiento por la gravedad los glaciares, mediante la aplicación de la energía mecánica derivada de su peso, de su flujo y de sobreexcavar directa y continuamente su lecho rocoso, lo harían con una intensidad directamente proporcional a su masa (es decir, a su peso) y a su ritmo de desplazamiento, sin que para el ejercicio de dicha capacidad fuesen precisas acciones previas de preparación ni condiciones estructurales especialmente favorables.

La existencia de los glaciares depende de la permanencia del hielo y la nieve a través del tiempo, proceso que depende de la interacción entre el clima y la topografía. La mayoría de los glaciares pueden ser subdivididos en dos zonas. La zona de acumulación, donde hay una ganancia neta de masa, principalmente por precipitación sólida, y la zona de ablación, donde hay una pérdida neta de masa, principalmente por la fusión del hielo y la nieve. Las zonas de acumulación y ablación están separadas por la línea de equilibrio, donde la acumulación anual es igual a la ablación anual. Como veremos más adelante la altura a la cual se desarrolla la línea de equilibrio (Altitud de la Línea de Equilibrio, ELA) está condicionada por la relación entre el clima local o regional y la topografía (Ruiz, 2013).

Los glaciares son grandes masas de hielo que se forman principalmente de la precipitación atmosférica sólida (nieve principalmente, granizo, hielo granulado, granizo menudo y bolillas de nieve) y que se acumulan de año en año, en los lugares más altos de las cordilleras en las zonas donde las temperaturas se mantienen igual o inferior 0 °C. Para que se forme un glaciar es necesario un balance positivo de la acumulación de nieve frente a su fusión. Progresivamente la nieve se convierte en hielo y, cuando éste ya forma depósitos de suficiente entidad, comienza a fluir valle abajo por efecto de la gravedad. Las zonas de acumulación se sitúan en los circos, bajo las cimas más altas donde se recogen las mayores precipitaciones de

nieve. Aportes por aludes o una orientación favorable son factores que pueden ayudar a una mayor acumulación de nieve y, por tanto, a una mayor formación de hielo que nutra el glaciar (Belmonte, 2010).

Existen dos géneros de glaciares muy bien diferenciados por su génesis y su dinámica y también por sus dimensiones y su configuración: Los glaciares regionales relacionados con las condiciones de extremo frío y sequía de los territorios polares y subpolares se caracterizan en principio y ante todo por sus enormes dimensiones y por su forma externa en casquete independiente de la configuración de la superficie que acoge sus hielos. En la actualidad sólo existen dos, los inlandsis de la Antártida y de Groenlandia, que suman el 97% de la superficie afectada por la acción glaciaria e incluyen el 99% de la masa de agua en estado sólido existente hoy en el planeta (Muñoz, 1995).

Los glaciares locales, por su parte, son numerosos, de extensión limitada, mucho menos espesos y se distribuyen por las áreas de montaña de todas las latitudes y continentes (excepto Australia), adaptando su forma a la configuración del relieve en que se acogen. La extensión que cada uno de ellos ocupa es en la mayor parte de los casos del orden de unos kilómetros cuadrados o unas decenas de  $\text{km}^2$ , siendo excepcionales los que recubren áreas de centenares de  $\text{km}^2$  y aún más los que superan el millar de  $\text{km}^2$ ; se calcula que suman en conjunto 450 000  $\text{km}^2$ , lo que sólo significa el 3 % de la superficie glaciada (Muñoz, 1995).

En Geomorfología su clasificación es en tres grandes géneros: Los glaciares de tipo escandinavo, también conocidos como glaciares de plataforma, ocupan superficies culminantes de topografía plana situadas por encima del nivel de las nieves, los glaciares de tipo alpino o glaciares de valle son aparatos de forma alargada acogidos en valles o en tramos altos de valle de las grandes montañas en los que se afianza la diferenciación entre un órgano colector o circo y un órgano difusor o lengua y los glaciares locales de tipo pirenaico, también conocidos como

glaciares de circo, se caracterizan ante todo por su pequeño tamaño y por la inexistencia o el muy escaso desarrollo del órgano de evacuación (Muñoz, 1995).

### **2.2.2. Glaciares de los Andes Tropicales.**

Los glaciares de montaña son uno de los componentes de la criósfera conocidos por su alta sensibilidad a los cambios climáticos a escala decenal. Dada su rapidez de respuesta a estos cambios, se los podría calificar de “centinelas del clima” (Francou et al., 2014).

La razón principal proviene del origen de los volúmenes de hielo que forman y que son el resultado de las precipitaciones sólidas: los glaciares registran sus variaciones de un año para otro. La segunda razón proviene de la ablación, proceso por el cual el glaciar pierde nieve y hielo. La ablación depende directamente del balance de energía en la superficie, el cual es el vínculo físico existente entre el glaciar y el clima (Francou et al., 2014).

Por último, el hielo que se forma tiene propiedades mecánicas visco-plásticas que hacen que fluya por gravedad a lo largo de las pendientes: por este mecanismo el glaciar transmite el excedente de masa acumulado en la parte superior y sus variaciones hacia la parte inferior llegando hasta la parte frontal. Esta transferencia de hielo y los movimientos del frente, avance, retroceso o estabilidad, desde la parte superior, lleva unos años o una década para que se produzca, el plazo depende de la pendiente media del glaciar, de su espesor máximo y de la temperatura existente al nivel del contacto entre el hielo y el lecho rocoso. En consecuencia, el movimiento del frente incorpora y traduce con cierto retraso el balance de masa, por lo tanto, refleja la variabilidad climática (Francou et al., 2014).

En cambio, si el hielo cerca de la cima es atrapado por la topografía y se mantiene a temperatura negativa hasta el sustrato rocoso, puede conservarse por siglos e incluso milenios y archivar una información continua sobre los climas del pasado, información a la que se puede acceder extrayendo una muestra y haciendo una serie de análisis en laboratorio, sobre todo químicos e isotópicos (Francou et al., 2014).

La sensibilidad de los glaciares de montaña al clima es más fuerte cuando estos son “templados”, es decir, que la totalidad de su hielo está a temperatura de fusión: un aporte mínimo de energía es entonces suficiente para causar el cambio de fase, o sea para convertir el hielo o la nieve en agua, la cual fluye hacia el torrente emisario. La mayoría de los glaciares andinos entran en esta categoría, a excepción de las partes que superan los 5800/6000 m de altura, que generalmente son glaciares “fríos” (Francou et al., 2014).

A pesar de su pequeño tamaño en términos de volumen a nivel mundial (equivalente a un poco menos de 0,3 mm de aumento del nivel del mar, es decir ligeramente inferior a los Alpes), estos glaciares son importantes por dos razones: 1) Son excelentes indicadores de la tendencia climática, evolución y fluctuaciones en varias décadas, sin duda entre los mejores indicadores de la zona tropical. 2) Desempeñan un papel local en la hidrología de las cuencas altas y contribuyen significativamente a los recursos hídricos (Francou et al., 2014).

Aun cuando las herramientas y métodos para estudiarlos son comunes a otros glaciares del mundo, su comportamiento y su respuesta a la variabilidad climática son bastante distintos. La característica principal que explica su gran sensibilidad a la evolución del clima en una escala de tiempo muy corta, es la persistencia a lo largo del año de condiciones que favorecen la ablación en su parte baja. Esta característica, y la coincidencia en el tiempo de los periodos de máxima acumulación y de máxima ablación, constituyen la principal originalidad de los glaciares tropicales. Estos dos periodos son muy distintos durante el año en otros climas (Francou et al., 2014).

### **2.2.3. Área de Estudio.**

El área de estudio del presente proyecto son los glaciares ubicados en la cordillera Huayhuash, localizado entre los límites de los departamentos de Lima, Ancash y Huánuco, se extiende con una longitud aproximada de 26 km entre las coordenadas paralelas de 10° 12' - 10° 27' de latitud sur y 76° 52' - 77°00' de longitud oeste. Esta zona presenta numerosos picos

que pasan los 6,000 m.s.n.m., como es el caso del nevado Yerupajá que tiene una altitud de 6,617 m.s.n.m. y es el segundo pico más alto en el Perú después del Huascarán (ANA, 2014).

La cordillera Huayhuash se encuentra en los Andes peruanos centrales al sur de un régimen tectónico dominado por la falla de la cordillera Blanca y al norte de la región definida por la llanura de Junín. La topografía occidental de la cordillera refleja una incisión profunda del cañón, que ha persistido desde el Plioceno (McLaughlin, 1924; Myers, 1976). Los valles en el lado occidental de la cordillera convergen para formar el río Pativilca que drena a 110 km al oeste hasta el Océano Pacífico.

Los valles orientales de la cordillera Huayhuash comprenden las cabeceras de propagación más al sur del Río Marañón que fluye hacia el noroeste a lo largo de 400 km antes de viajar hacia el este hasta el Océano Atlántico. El drenaje de los principales glaciares del oeste tiene forma de “V”, la incisión de estos glaciares se observa en el arrastre de sedimentos y son alimentados por unos pocos valles tributarios. A diferencia de los amplios valles en forma de “U” orientados de este a oeste de la cordillera que contienen muchas corrientes tributarias significativas que siguen la forma estructural regional de norte a sur. Los valles orientales están llenos de glaciar sedimentado proveniente parcialmente del Holoceno (Hall et al., 2009).

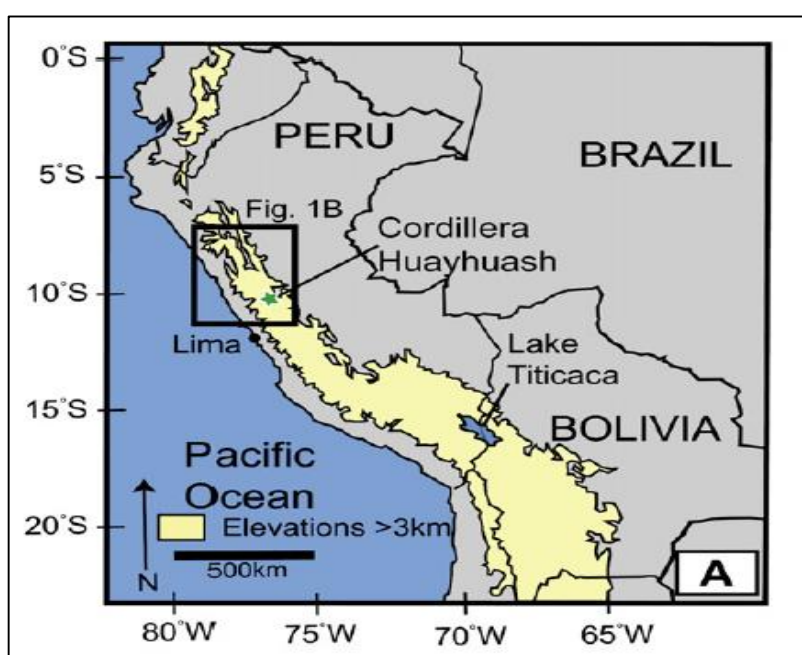


Figura 1. Localización de la cordillera Huayhuash (Hall et al., 2009).

El margen sudamericano se caracteriza por fuertes precipitaciones y gradientes de temperatura de este-oeste. La causa principal de estas gradientes es la barrera orográfica de norte-sur de los Andes. Combinadas con la circulación de Hadley, los procesos convectivos asociados con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ) y un componente regional de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), promueven una alta precipitación en el flanco oriental de los Andes (Johnson, 1976).

En las escalas de tiempo interanuales, las fluctuaciones de las precipitaciones están relacionadas con las variaciones de la temperatura de la superficie del mar, la señal de El Niño de Oscilación del Sur (ENOS), con eventos El Niño más cálidos y secos, y La Niña eventos más fríos y húmedos (Vuille, Bradley, & Keimig, 2000). El verano austral es la estación húmeda en los Andes tropicales, con un 75% de la precipitación anual total en la cordillera Huayhuash (w0.5-2 m/año) que cae durante los meses de noviembre-abril” (Johnson, 1976).

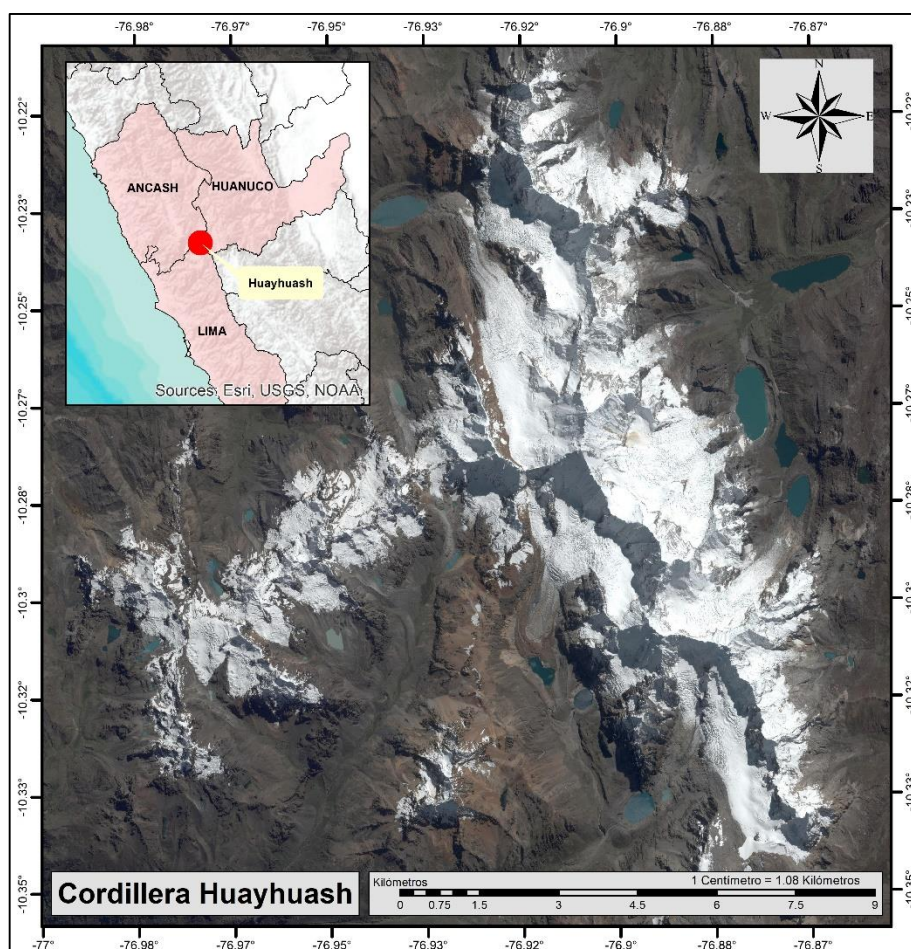


Figura 2. Área de estudio, cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco).

#### **2.2.4. Estimaciones de las Altitudes de la Línea de Equilibrio de un glaciar.**

La ELA, al ser una isohipsa, divide teóricamente dos sectores de un glaciar: la zona de acumulación y la zona de ablación; la zona de acumulación es donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa (innivación, redistribución eólica de nieve y avalancha); y la zona de ablación es donde los fenómenos de fusión y sublimación provocan pérdidas de masa y se relaciona de forma directa con la evolución de los glaciares (Vásquez & Úbeda, 2016).

La ELA es significativa para la comprensión de los climas actuales y pasados; y los cambios en la elevación de la ELA se pueden utilizar para seguir cambios en el clima. Es importante observar que las reconstrucciones del paleoglaciar determinan el ELA asumiendo que el glaciar está en equilibrio con el clima. Esto es equivalente a la ELA para el balance neto cero para glaciares existentes, donde la ELA anualmente puede ser altamente variable (Pellitero et al., 2015).

La ELA se acopla con el clima principalmente a través de la precipitación invernal, que se correlaciona con la acumulación (aunque esto también se ve afectada por la acumulación de nieve transportada por el viento y las avalanchas) y la temperatura del aire en verano, que se correlaciona con la ablación (aunque otros factores como la radiación de onda corta entrante y la radiación de onda larga, flujo de calor sensible, calentamiento de la capa de nieve desde la zona de congelamiento pueden jugar un papel significativo). Las variaciones en el ELA se atribuyen comúnmente a los cambios en una o ambas de estas variables climáticas (Pellitero et al., 2015).

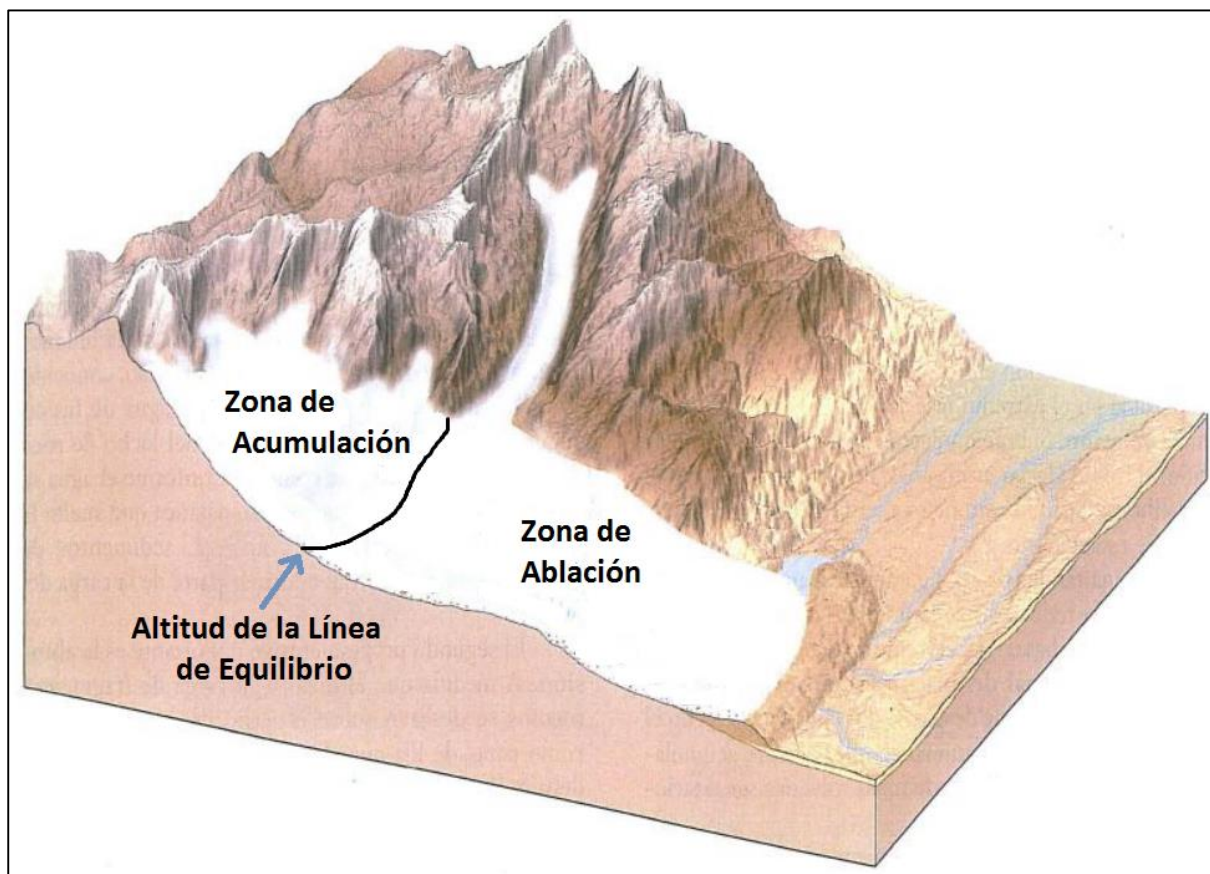


Figura 3. Altitud de la línea de equilibrio (ELA).

Es usualmente requerida la estimación de la ELA de un glaciar actual para la cual observaciones de Balance de Masa directos no están disponibles, o la estimación de la ELA de una formación glaciar en la cual únicamente su extensión puede ser inferida por sus características geomorfológicas. A menos que se indique lo contrario, en el siguiente análisis el término ELA se referirá a un glaciar en un estado hipotético de balance, por ejemplo, cuando el balance de masa neto de todo el glaciar es o podría ser cero. En un glaciar en ganancia o retroceso no es ésta la posición (denominada abajo “ELA común”) donde las mediciones del balance superficial o las observaciones aéreas de la línea de Firn mostrarían igualdad de acumulación y ablación local (Osmaston, 2005).

Los métodos (Acumulación Área (AA), Acumulación Área Balance Ratio (AABR) y Acumulación Área Balance Índice (AABI)), tienen en cuenta la hipsometría de un glaciar, a diferencia de otros métodos de uso general. Todas se basan en el principio de que las partes de un glaciar que están muy por encima o por debajo del ELA tienen mayores lugares de balances



netos (más o menos) y por lo tanto tienen más influencia sobre el total del balance de masa de un glaciar, y por consiguiente en la ELA, más que aquellos que están cerca. Por lo tanto, requieren conocer la posición del margen de un glaciar y datos de contorno para su superficie, de modo que el área y la altitud media de las bandas sucesivas de su superficie pueden ser determinadas. Para los Paleoglaciares hay necesariamente algunas incertidumbres acerca de ambas variables, especialmente donde hay una larga pared empinada, pero éstas no son peores que aquellas que afectan a otros métodos morfométricos. Los tres métodos son demasiado distintos a partir de lo muy similarmente llamado Acumulación – Área Ratio (AAR), métodos que no toman en cuenta explícitamente la hipsometría detallada o de Balance Ratio (BR) (Osmaston, 2005).

El método de AA hace la suposición que el BR (relación de las pendientes del gráfico de masa de balance-altitud por encima o debajo de la ELA) es unitaria y en consecuencia ésta es sencilla de calcular. El método AABR supone que la curva de la relación de balance de masa/altitud consiste aproximadamente en dos segmentos lineales, normalmente con diferentes pendientes por encima y por debajo de la ELA, y añade la refinación de aplicar cualquier BR deseado para estimar, entonces el cálculo es más complejo. El método AABR desarrolla esto más para la aplicación de cualquier forma predeterminada de la curva de balance de masa. Este último método no ha sido publicado previamente. La validación de las estimaciones de las ELA realizadas por estos y otros métodos rara vez recibe suficiente atención. La elección del Ratio o Índice utilizado se justifica a menudo en referencia a otros glaciares, que pueden estar en un entorno climático completamente diferente. Con los paleo-glaciares, que se utilizan para tratar de inferir el clima pasado el problema es especialmente agudo (Osmaston, 2005).

#### **2.2.5. Balance de Masa Glaciar**

El balance de masa es el dato de base del glaciólogo, así como la medición de los caudales de un río lo es para un hidrólogo. Como no se puede “pesar” el conjunto de un glaciar

cada año para ver cómo evoluciona su masa, se recurre a mediciones parciales (Francou et al., 2014).

El balance de masa glaciar ( $B_n$ ) corresponde a la sumatoria de la acumulación y de la ablación glaciar. Ese cambio de masa se ve representado en un volumen equivalente de agua ocurrido durante un periodo de tiempo definido, determinado normalmente, por la duración de un año hidrológico (IDEAM, 2014).

Esta información permite conocer la intensidad del calentamiento de la baja atmósfera y percibir los impactos en el sistema de alta montaña; así como conocer el comportamiento de los glaciares en función de los fenómenos que se presentan en las diferentes escalas de variabilidad climática (IDEAM, 2014).

Para extender el balance a todo el glaciar, se utilizan diversos puntos de medición (balizas, pozos, sondeos) organizados en una red bien definida. El principio básico es de ponderar el balance medido por el área del rango relativo del glaciar, según la expresión: (IDEAM, 2014).

$$B_n = (1/S) [\Sigma (b_{n1}S_1 + b_{n2}S_2 + \dots + b_{nj}S_j)]$$

Donde:

$B_n$ : balance neto específico del glaciar

$S$ : superficie total

$B_{n1}, b_{nj}$ : balance ponderado por área

$j$ : rangos de altura

### **2.2.6. Cronología glaciar y la Pequeña Edad de Hielo (PEH)**

Los glaciares tropicales han experimentado un retroceso acelerado en las últimas décadas, lo constatan todos los observadores incluso los no especialistas. Sin embargo, para demostrarlo hay que remontarse a varios siglos atrás y reconstruir todo el proceso de desglaciación desde el máximo glaciar. Este, conocido a escala mundial como la “Pequeña

Edad de Hielo”, se produjo en esta parte de los Andes entre mediados del siglo XVII y mediados del siglo XVIII. El retroceso comenzó alrededor de 1730-1750, por lo tanto, antes que la humanidad pudiera tener una influencia significativa sobre el clima y su calentamiento. No obstante, la caída de los glaciares se ha acentuado fuertemente en la segunda mitad del siglo XX, especialmente después de 1976. Se puede decir que en las últimas décadas la desglaciación tomó un ritmo acelerado, sin precedentes en los últimos tres siglos, ya que los glaciares han perdido en treinta años entre el 30% y el 50% de su superficie, y los más vulnerables han desaparecido (Francou et al., 2014).

Comprender el clima de los últimos siglos puede ayudarnos comprender mejor la variabilidad climática natural de nuestros días y hacer predicciones climáticas. La vista convencional del desarrollo del clima durante el último milenio ha sido la secuencia simple de una Pequeña Edad de Hielo (PEH) seguida de un calentamiento en la última parte del Siglo XIX y durante el Siglo XX (Nesje et al,2003).

La Pequeña Edad de Hielo (PEH), es la última pulsación fría globalmente reconocida en la Tierra, que se caracterizó por una expansión de los glaciares de climas polares, subpolares y tropicales. Este episodio acontecido entre el Siglo XVI y mediados del siglo XIX, durante el cual el clima en Europa se tornó frío y ocasionalmente tormentoso (Rabatel, Francou, Cáceres, Ceballos, & Wagnon, 2013).

Otro de los periodos conocidos es Dryas Reciente, considerado como el evento de cambio climático abrupto canónica. El nombre se deriva de los registros de polen sueca y danesa de 1800 finales que indicaron un retorno de la planta tolerante al frío, *Dryas octopetala*, siguiendo luego un intervalo cálido. En este momento, la insolación de verano boreal (la fuerza impulsora detrás de desglaciación) se acercaba a su punto máximo. Se ha identificado este periodo en el norte Atlántico, el norte del Pacífico, en Asia, América del norte y en los trópicos (Carlson, 2013).

El Último Máximo Glacial (UMG, ocurrido entre ~30.000-17.500 años AP), se refiere al máximo volumen de hielo durante el último ciclo glacial. Durante este evento, hace aproximadamente 20.000 años antes del presente. En este último periodo el hielo continental alcanzó su máxima magnitud a nivel global, terminó abruptamente (Última Terminación Glacial, 17.500-11.500 años AP) siendo uno de los cambios climáticos de mayor magnitud y rapidez en el registro geológico (Ehlers & Gibbard, 2007).

### **2.2.7. Reconstrucción de los eventos climáticos pasados**

Los glaciares forman parte del conjunto de información utilizado para reconstruir climas pasados. Los métodos son tomados de la geomorfología, cuando se reconstruyen las extensiones glaciares a partir de depósitos (morrenas), y de la geoquímica clásica e isotópica cuando se analizan los hielos antiguos bien conservados para extraer una señal climática (Francou et al., 2014).

Para cartografiar los cordones morrénicos conservados que “trazan” una parte de las fluctuaciones glaciares pasadas, se recurre a la fotogrametría utilizando pares de fotografías terrestres o aéreas, o levantando topografías en el terreno con una estación total o un GPS de precisión. Los modelos numéricos obtenidos reconstituyen las áreas ocupadas por los glaciares cuando estos depositaban los cordones laterales y frontales. Si los lechos rocosos en los cuales se escurrían las corrientes de hielo todavía son visibles, es decir, no muy recubiertas de productos detríticos posteriores, se pueden “llenar” las depresiones delimitadas por las morrenas y reconstruir así los volúmenes de hielo con alta precisión en muchos casos (Francou et al., 2014).

En los Andes tropicales, métodos que utilizan curvas de crecimiento de algunos líquenes (método llamado la liquenometría\*) o las tasas de producción de ciertos isótopos radioactivos como el berilio 10 ( $^{10}\text{Be}$ ), han sido los más comunes en el periodo que cubre los últimos siglos desde la Pequeña Edad de Hielo (Francou et al., 2014).

La liquenometría utiliza líquenes de la especie *Rhizocarpon Geographicum* que crecen en las rocas silíceas (granito, gneis, arenisca, cuarcita, algunas rocas volcánicas). El muestreo se concentra en los líquenes más circulares y más grandes, uno solo por cada roca, considerando un número significativo de puntos de muestreo en la parte alta de las morrenas, de preferencia en los sectores más estables. A nivel de las distribuciones obtenidas en estas muestras, se encontró que el análisis estadístico más apropiado era el que se refiere a la teoría de los valores extremos. Lo más difícil es obtener una buena curva de crecimiento para este tipo de líquen en una región dada, lo cual solo puede hacerse utilizando materiales cuya edad es conocida (lápidas sepulcrales, entradas de mina, represas, lavas volcánicas documentadas en la historia, etc.) (Francou et al., 2014).

Se han realizado este tipo de estudios en dos sectores de los Andes Centrales: En la cordillera Blanca (9-10°S, 77°O) (Solomina, Haeberli, Kull, & Wiles, 2007) y la cordillera Real de Bolivia (15- 16°-67-68°O), ambos basados en la especie líquénica *Rhizocarpon* (Rabatel, Deline, Jaillet, & Ravanel, 2008).

El uso del isótopo 10 del berilio ofrece una buena alternativa al método liquenométrico, con la condición de que la tasa de producción de este isótopo, modulado por la actividad solar, sea conocida. Este método exige protocolos de muestreo complejos, y debido al costo de los análisis, la cantidad de rocas muestreadas es necesariamente limitada. La utilización de las técnicas de análisis de laboratorio es necesaria. Este método de datación, como la liquenometría, no escapa a incertidumbres intrínsecas y generan márgenes de error. Lo más seguro es practicar ambos métodos, uno que sirve para validar al otro, sabiendo que cada uno posee su margen de incertidumbre y que, en el mejor de los casos, estos márgenes pueden superponerse en parte (Francou et al., 2014).

La utilización de la datación con radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) da como resultado edades muy imprecisas para los últimos siglos, debido a la tasa de producción de este isótopo, modulado

también por la actividad solar. Tiene que ser utilizada en materia orgánica no contaminada, pero la posición estratigráfica de esta es a veces compleja y requiere una interpretación, que es de por sí una fuente de incertidumbres (Francou et al., 2014).

Otro de los métodos para determinar la cronología de la PEH son los Isótopos ambientales. Gran parte de lo que conocemos sobre las variaciones climáticas del Cuaternario se deriva de estudios sobre la composición isotópica de la cubierta de hielo polar. Los casquetes de hielo, formados por la precipitación de nieve sobre extensas regiones casi llanas, con temperaturas medias anuales negativas, conservan la estratificación vertical, aunque el espesor de las capas anuales disminuye con la profundidad, sobre todo, a causa del proceso de compactación, que hace que la nieve se transforme primero en hielo granular y luego en hielo compacto. Las variaciones en el contenido de  $\delta$  oxígeno 18 y de deuterio conservado en el hielo han hecho posible la reconstrucción detallada de las paleotemperaturas de altas latitudes durante el último ciclo glacial (Rozanski & Gonfiantini, 1990).

#### **2.2.8. Reconstrucción de Volumen y Superficie de Paleo-glaciares.**

Los métodos de reconstrucción de volumen y superficie paleoglacial se basan en evidencia morfológica de la geometría glacial anterior (por ejemplo, morrenas frontales y laterales, canales de agua de deshielo laterales, líneas de corte, terrazas kame y deltas de contacto de hielo), ya sea iniciado (iterativo) o restringido (dinámico) el modelo. Idealmente, habría una gran cantidad de pruebas de relieve disponibles para la reconstrucción, pero en realidad, la mayoría de los accidentes geográficos están perdidos o fragmentados, especialmente en la zona de acumulación, y con frecuencia degradan cada vez más con los años. Por consiguiente, la mejor práctica es utilizar la forma de relieve como evidencia disponible en combinación con reconstrucciones derivadas numéricamente. Estos enfoques numéricos tienen sus raíces en las ecuaciones constitutivas para el movimiento del glaciar y

crean un perfil de equilibrio glaciar sobre lo conocido, formación y base subglacial. Este enfoque hace tres supuestos (Pellitero et al., 2016):

1. La topografía de hoy en día es la misma que la topografía basal del paleoglaciar. Evidencia de considerable actividad geomorfológica post-glacial por procesos de movimiento proglaciales, periglaciares, paraglaciar, fluviales y/o movimientos de masa (por ejemplo, formación de lagos o movimientos de masas grandes) debe ser tomado en consideración, y en lo posible, la topografía actual corregida.
2. El glaciar reconstruido estaba en equilibrio con el clima.
3. El Paleoglaciar era de terminación en tierra. Impactos de división en el balance de masas a través de cambios de flujo geométricos y de masas.

#### **2.2.9. Modelado de la topografía del lecho glaciar**

Como el agua proveniente del deshielo de glaciares juega un papel importante en la hidrología local (hidroelectricidad), hidrología regional (agua dulce, agricultura) e hidrología global (aumento del nivel del mar), una amplia gama de enfoques se ha desarrollado para evaluar el cambio futuro del glaciar y la pérdida de volumen en la glaciología o modelos hidrológicos (Linsbauer et. al, 2012).

Con un enfoque en la escala regional, los modelos hidrológicos se utilizan con frecuencia para evaluar impactos del cambio climático en los glaciares. Aunque estos modelos solo pueden funcionar con áreas cubiertas recientemente de glaciares, las simulaciones más realistas y transitorias de la evolución futura del glaciar requieren el conocimiento de la topografía subglacial, es decir el lecho glaciar, pero como la información sobre los lechos de los glaciares está escasamente disponible a partir de mediciones directas (por ejemplo, transectos del radar de penetración terrestre - GPR), se aplican modelos numéricos para reconstruir el lecho de glaciares individuales y evaluar su evolución futura. Comparados con estos enfoques de modelado bastante complejos, estudios recientes han presentado enfoques

simplificados para la reconstrucción del lecho glaciar que funcionan para varios glaciares (Linsbauer et. al, 2012).

Un análisis más detallado de los lechos de glaciares modelados podría permitir la detección de depresiones, que se pueden considerar como sitios potenciales de formación de lagos en el futuro. Dichos lagos pueden mejorar fuertemente el derretimiento de los glaciares y también son de interés para las compañías hidroeléctricas. El método solo requiere esquemas de glaciares, un DEM y un conjunto de líneas de ramificación (Branch Line) digitalizadas como entrada. Calcula los valores de espesor de hielo dependientes de la pendiente para sectores de equidistancia vertical de 50 m a lo largo de las líneas de ramificación. Se reconstruye el lecho glaciar (es decir, se extrapola espacialmente) a partir de estos valores de espesor local y el perfil del glaciar para la extrapolación espacial de valores medidos del espesor del hielo. Se basa principalmente en el álgebra de mapas que combina varias cuadrículas de entrada. Por lo tanto, es delgado desde el punto de vista informático y aplicable a escala regional, manteniendo al mismo tiempo características de los glaciares individuales (Linsbauer et. al, 2012).

#### **2.2.10. Impacto del Aumento de la Temperatura Media Mundial**

Actualmente se considera que un aumento de la temperatura media mundial de dos grados Celsius (2 °C) sobre los niveles previos a la Revolución Industrial es prácticamente inevitable (Hansen, Sato y Ruedy, 2012), a menos de que se tomen medidas drásticas e inmediatas. Un cambio climático de tal magnitud trastornaría profundamente el sustento, las condiciones sociales y los ecosistemas (IPCC, 2007b).

A pesar de que existe cierta incertidumbre en cuanto a la rapidez del cambio, es probable que los efectos se incrementen con el tiempo. Además, se anticipan ciertos efectos climáticos de retroalimentación adversos, o puntos de inflexión, que todavía no son completamente entendidos (Ackerman y Stanton, 2011). Entre los principales efectos físicos que se anticipan en la región figuran:



- Pérdida de humedad y temperatura del suelo, así como alteración de los regímenes pluviométricos, lo que incidirá en el rendimiento de las zonas agroecológicas.
- Aumento del nivel y temperatura de la superficie del mar, afectando zonas costeras y marinas.
- Mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos en zonas costeras.
- Incremento de la exposición a enfermedades tropicales transmitidas por vectores, causada por el aumento de temperatura y clima cambiante.
- Reducción acelerada del tamaño de los glaciares en los Andes originada por el calentamiento.
- Impactos en las cuencas hidrográficas generados por la alteración de regímenes pluviométricos.
- Posible extinción paulatina de la selva tropical.
- Pérdida de biodiversidad e integridad de ecosistemas.

Si no se toman medidas de adaptación, estos impactos físicos tendrán consecuencias económicas y sociales que muy probablemente impedirán el desarrollo sostenible y que pueden atrasar el logro de mejores niveles de vida en la región e incrementar el costo de conseguirlo. Por ejemplo, puede que los rendimientos aumenten gracias al efecto de fertilización por CO<sub>2</sub> o a condiciones meteorológicas más propicias (Nelson et al., 2010).

#### **2.2.11. Retroceso Glaciar en Regiones de los Andes de Tropicales.**

Los cambios observados en la temperatura han provocado un rápido y acelerado retroceso de los glaciares tropicales en toda la región de los Andes tropicales. Aunque la disminución de las precipitaciones puede haber contribuido a ese retroceso a escala regional, la falta de una tendencia negativa coherente de las precipitaciones en toda la extensión de los

Andes tropicales indica que los cambios en las precipitaciones no fueron el principal factor determinante de los cambios observados (Rabatel et al., 2013).

En Venezuela, los cinco glaciares de circo restantes (de los 10 que aún existían en 1952) ya no están en equilibrio con el clima moderno y solo ocupan, en total, 1,2 km<sup>2</sup> (Carrillo et al., 2010). Todos registraron un rápido retroceso durante el siglo XX, al perder más del 95% de su superficie desde 1850 (Schubert, 1992).

En Colombia, se conservan actualmente seis cadenas montañosas con glaciares, mientras que ocho glaciares desaparecieron por completo en el último siglo (Ceballos et al., 2006). De acuerdo con Poveda y Pineda (2009), la superficie total de glaciares que quedaba en Colombia en 2007 era de 45 km<sup>2</sup>, con un promedio de pérdida de superficie glaciar estimado en 3 km<sup>2</sup>/año.

En Ecuador, los glaciares en los volcanes Antizana, Cotopaxi y Chimborazo se han estudiado con mayor detalle. Un glaciar del Antizana, llamado glaciar 15, ha estado retrocediendo durante los últimos 50 años, pero su índice de retroceso fue de siete a ocho veces más veloz entre 1995 y 2000 que durante el período 1956–1993 (Francou et al., 2000). En la tendencia de largo plazo se superponen períodos de retroceso más veloces o más lentos, que se han vinculado con la fase de Niño-Oscilación del Sur (ENOS), debido al balance de masas altamente negativo en el Antizana durante El Niño, mientras que el balance de masas se mantiene casi equilibrado durante los episodios de La Niña (Francou et al., 2004).

La mayor extensión de glaciares tropicales se encuentra en los Andes peruanos, en particular en la Cordillera Blanca, la cadena montañosa tropical con mayor densidad de glaciares del mundo. En 1970, los 722 glaciares de la Cordillera Blanca aún cubrían una superficie de 723,4 km<sup>2</sup> (Ames et al., 1989), pero para finales del siglo XX esa cifra se había reducido a menos de 600 km<sup>2</sup> (Georges, 2004). Racoviteanu et al. (2008), estimaron que la superficie total de glaciares había disminuido 22.4% entre 1970 y 2003.

También se observaron grandes tasas de retroceso en glaciares individuales de la Cordillera Blanca que se estudiaron en mayor detalle, así como en la cordillera Ampato, más árida, en el sudoeste de Perú y en la cordillera de Vilcanota en el sur de Perú. De igual modo, se ha observado un rápido retroceso de los glaciares en la Cordillera Real de Bolivia. Los glaciares de Charquini, por ejemplo, han perdido entre 65% y 78% del tamaño que tenían en la Pequeña Edad de Hielo y las tasas de recesión se han cuadruplicado en las últimas décadas (Rabatel et al., 2006).

A la larga, estos cambios en el volumen de los glaciares provocarán cambios considerables en la hidrología estacional de glaciares aguas abajo. Se prevé que los cambios más importantes en el caudal ocurran durante la estación seca, cuando los glaciares liberan agua derretida que inicialmente retienen en forma de nieve y hielo (Viviroli et al., 2011).

La nieve que cae en los Andes inicialmente se almacena en forma de hielo en los glaciares de montaña antes de que se libere al cabo de cierto tiempo y se sume al caudal base de la estación seca. Por consiguiente, los glaciares desempeñan una función esencial como amortiguadores cruciales de las precipitaciones estacionales y suministran agua durante la estación seca para numerosos usos domésticos, agrícolas o industriales (Vuille et al., 2008a).

Este servicio ambiental de los glaciares ha sido documentado, por ejemplo, por Kaser et al. (2003), quienes demostraron que el porcentaje de zona glaciar en las cuencas de captación de los Andes tropicales guarda una estrecha relación con su capacidad para almacenar las precipitaciones.

En un caso hipotético futuro en que los glaciares sigan retrocediendo y lleguen a desaparecer por completo, al menos de las cuencas de captación de menor elevación, resulta lógico suponer que la esorrentía pasará gradualmente de suministrar agua en forma continua a una situación en la que en su mayor parte se concentrará en la estación lluviosa con un caudal base escaso o nulo en la estación seca. Este problema es de especial preocupación en los Andes

tropicales, donde la fuerte radiación solar impide la formación de una capa de nieve estacional. A diferencia de lo que ocurre en los Alpes o en las Rocallosas, el agua del deshielo de la nieve no aporta una reserva de agua adicional que cambie estacionalmente (Kaser et al., 2010).

El caso hipotético que se acaba de describir ya se puede observar en algunas regiones de los Andes tropicales. Mark et al. (2005), por ejemplo, señalan que del 30% al 45% del caudal que fluye de la Cordillera Blanca al valle del río Santa en la estación seca se puede atribuir al derretimiento de glaciares que no se renueva. Por su parte, Mark y McKenzie (2007) mostraron que la descarga glaciaria relativa en la cuenca superior del río Santa está aumentando. De manera similar, las mediciones en el glaciar Zongo, en la cordillera Real, indican que de la cuenca de captación sale más agua en forma de escorrentía que la suministrada por la precipitación y que el derretimiento del glaciar aporta la diferencia (Ribstein et al., 1995).

### **2.3. Definiciones conceptuales**

- Altitud de la línea de equilibrio (ELA). - Es el nivel altimétrico donde el balance de masa alcanza el valor de 0 mm equivalentes de agua y separa la zona de ablación de la zona de acumulación glaciaria.
- Ablación glaciaria. - Proceso mediante el cual el glaciar acumula masa, esencialmente gracias a las precipitaciones sólidas recogidas en su superficie.
- Acumulación glaciaria. - Proceso mediante el cual el glaciar acumula masa, esencialmente gracias a las precipitaciones sólidas recogidas en su superficie.
- Baliza. - Es un objeto señalizador, utilizado para indicar un lugar geográfico
- Balance de Masa Glaciaria (Bn). - Corresponde a la sumatoria de la acumulación y de la ablación glaciaria, en la unidad espacial de referencia en el tiempo t.
- Criósfera. - Describe las partes de la superficie de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido, que incluye el hielo del mar, el hielo del lago, el hielo del río, los glaciares, las capas de hielo y terreno congelado.

- Cronología. - Parte de la historia que se encarga de la datación y ordenación de los hechos históricos.
- Datación. - Determinación de la fecha en que surge o se produce una cosa (escrito, objeto, obra, etc.) o de la edad de rocas, minerales, seres vivos o restos arqueológicos.
- Desglaciación. - Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña, causado por el calentamiento global.
- Dryas. - Especie florística cuya desaparición da nombre al periodo frío denominado “Dryas Reciente” o “Younger Dryas”.
- Enfriamiento. - Disminución de la temperatura de un cuerpo o de un lugar.
- Escorrentía. - Agua de lluvia, nieve u otras fuentes que circula libremente sobre la superficie de un terreno.
- Glacial. - Referido normalmente al clima, o a las zonas o períodos en que hace este tipo de clima.
- Glaciar. - Una masa perenne de hielo, y, posiblemente, neviza y nieve, que se origina en la superficie de la Tierra por la recristalización de la nieve u otras formas de precipitación sólida que muestra evidencia actual o pasada de flujo.
- Imagen satelital. - Producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste.
- Isohipsa. - Línea de igual altitud de geopotencial sobre una superficie dada, generalmente una superficie isóbara.
- Impacto. - Es el efecto que produce una actividad antrópica o natural sobre un medio.
- Nival. - De la nieve o de los efectos que causa.

- Mapa de Elevación Digital (DEM). - Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.
- Morrena. - Montón de piedras, arena, barro y otros materiales que erosiona, transporta y acumula un glaciar.
- Método AABR (Área x Altitud Balance Ratio). - 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.
- Pequeña Edad de Hielo (PEH). - Último periodo climático frío, tuvo lugar entre el siglo XIV y a finales del siglo XIX, se caracterizó por la expansión de los glaciares.
- Paleoclima. - Estudio de los climas sucedidos antes de que fuéramos capaces de usar tecnología que nos permitiera analizar el mismo, utiliza la interpretación de registros ambientales naturales denominados proxy para averiguar el clima del pasado.
- Paleoglaciar. - Masas de hielo del pasado, cuya delimitación se basa en el reconocimiento e interpretación de las morrenas que depositaron durante sus fases de expansión.
- Proxys paleo-climáticos. - Conjunto de datos indirectos que registran la variabilidad climática del pasado.
- Zona de Acumulación glaciar. - Zona donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa glaciar (innivación, redistribución eólica de nieve y avalancha).
- Zona de Ablación glaciar. - La zona donde los fenómenos de fusión y sublimación provocan pérdidas de masa glaciar.

## **2.4. Formulación de la Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis General**

El impacto de la variación de temperatura se relaciona directamente con la desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas**

- Hipótesis Específica 1:

La variación de la temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona directamente con la variación de la superficie y volumen glaciar en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

- Hipótesis Específica 2:

La variación de la temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona directamente con la variación de la ELA en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

### 3.1. Diseño Metodológico

#### 3.1.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es básica, por que buscamos ampliar y profundizar los conocimientos científicos existentes acerca de glaciares.

#### 3.1.2. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es explicativo, porque pretende generar un sentido de entendimiento del comportamiento de las variables, cuantificar sus relaciones y conocer la estructura de los factores que la influyen.

#### 3.1.3. Diseño

El diseño metodológico utilizado es longitudinal, porque busca conocer la relación de hechos y fenómenos de la realidad a través del tiempo.

#### 3.1.4. Enfoque

El enfoque es cuantitativo; con la recolección de datos se pretende medir un fenómeno, utiliza la estadística y es secuencial

### 3.2. Población y Muestra

Glaciares en el año 2017, glaciares en el año 1962 y paleoglaciares (morrenas) estimados cartografiados en el mapa geomorfológico de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco).

### 3.3. Operacionalización de Variables e Indicadores

- Variable Independiente (X)

X = Variación de Temperatura en grados Celsius

Medición:

$X_1 = ^\circ\text{C}$ ,  $X_2 = ^\circ\text{C}$



- Variable Dependiente (Y)

Y= Desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco).

$Y_1 = \text{km}^2$ ,  $Y_2 = \text{Mm}^3$ ,  $Y_3 = \text{m}$

Tabla 1

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ITEM
Variable Independiente: Variación de Temperatura en grados Celsius	Variación en el tiempo de la temperatura media de la atmósfera terrestre (IPCC, 2007b)	Temperatura	$\Delta$ Temperatura de la PEH al año 1962	$X_1 = ^\circ\text{C}$
			$\Delta$ Temperatura del año 1962 al 2017	$X_2 = ^\circ\text{C}$
Variable Dependiente: Desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)	Proceso de deshielo, fusión y extinción de los glaciares; se produce por un incremento de la temperatura media del aire y el consecuente cambio climático (Lugo, 2011).	Superficie	Variación de la superficie glaciar	$Y_1 = \text{km}^2$
		Volumen	Variación del volumen glaciar	$Y_2 = \text{Mm}^3$
		Altitud	Variación de la ELA	$Y_3 = \text{m}$
	Cese de una glaciación o periodo glaciar (Tejada, 1994).			

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

#### 3.4.1. Técnicas a emplear

##### 3.4.1.1. *Glaciares del año 2017.*

La recolección de datos, para la aplicación de la metodología de investigación, se basó en un análisis geomorfológico (uno de los métodos que permite reconstruir el parámetro ELA), con el que se elaboró un mapa de los glaciares del área de estudio, utilizando el programa informático Google Earth Pro, esta herramienta muestra una superposición de imágenes obtenidas por imágenes satelitales, fotografías aéreas e información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo. Además, fue necesario para el cartografiado, la utilización de una Imagen Satelital Base, tomada del Instituto Geofísico Nacional del Perú, de fecha 17 de junio del 2017.

Cabe mencionar la importancia del factor experiencia para la identificación geomorfológica *In Situ* y de gabinete, motivo por el cual la presente investigación tuvo el aporte y la supervisión de investigadores expertos en el tema, proporcionados por el Proyecto.

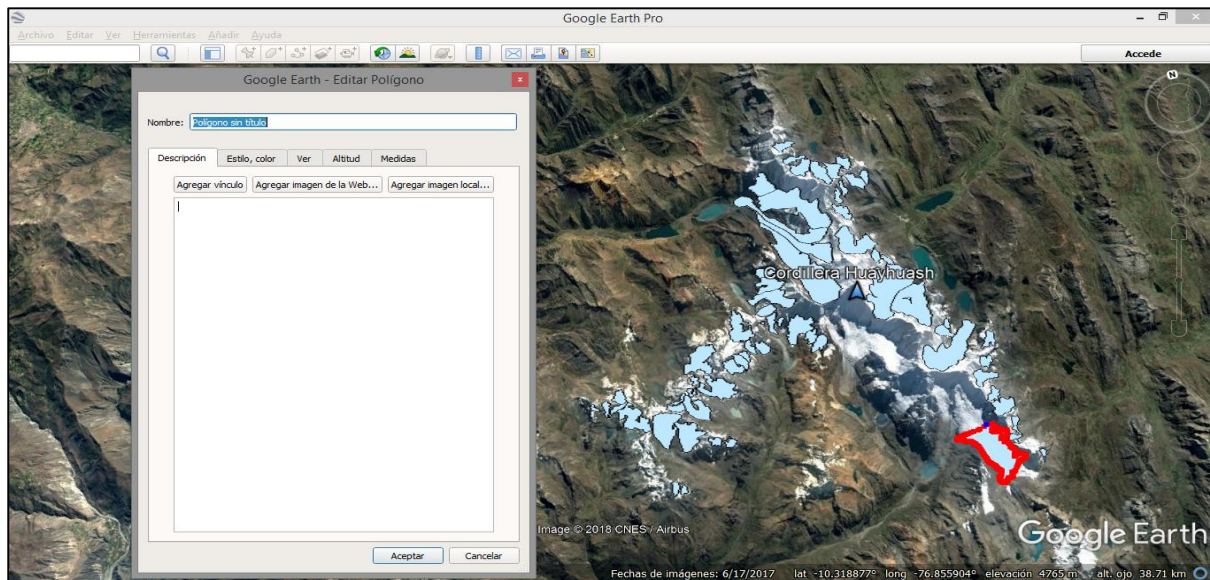


Figura 4. Cartografiado de los Glaciares del 2017 con la herramienta Polígono en Google Earth Pro.

#### 3.4.1.2. *Glaciares del año 1962.*

Para los glaciares del año 1962, se requirió de 27 fotografías aéreas proporcionadas por el INGEMMET, las cuales fueron georreferenciadas en el software informático ArcGIS sobre una imagen satelital base.

Georreferenciada el área de estudio en su totalidad, fue necesario superponer las fotografías para contar con un nuevo mapa base, en el que se realizó el cartografiado usando como guía los glaciares ya delimitados del año 2017 y teniendo cuenta el análisis geomorfológico utilizado anteriormente.

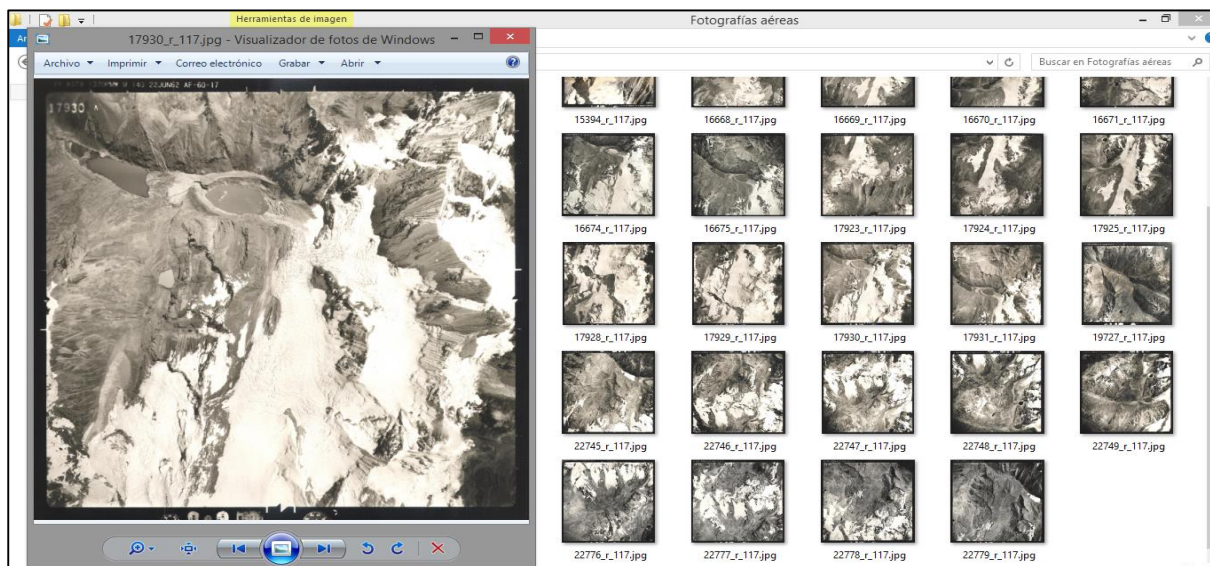


Figura 5. Imágenes Aéreas de la Cordillera Huayhuash en el año 1962.

### 3.4.1.3. *Glaciares de la PEH (Paleoglaciares).*

La recolección de datos para los glaciares del pasado o paleoglaciares, requiere la identificación y delimitación geomorfológica de cordones morrénicos y formas glaciares correspondientes a la PEH, esta acción debe tener en cuenta la configuración geomorfológica del terreno, es decir, interpretar la morfología del área fuente y la forma de la vertiente por la que se canalizaban los glaciares del pasado.

A partir de la unión de los cordones morrénicos con los glaciares ya cartografiados del año 2017 y 1962, trabajados en el programa Google Earth, se obtienen los paleoglaciares de la PEH (Figura 6. Identificación de los glaciares de la PEH a partir de cordones morrénicos.).

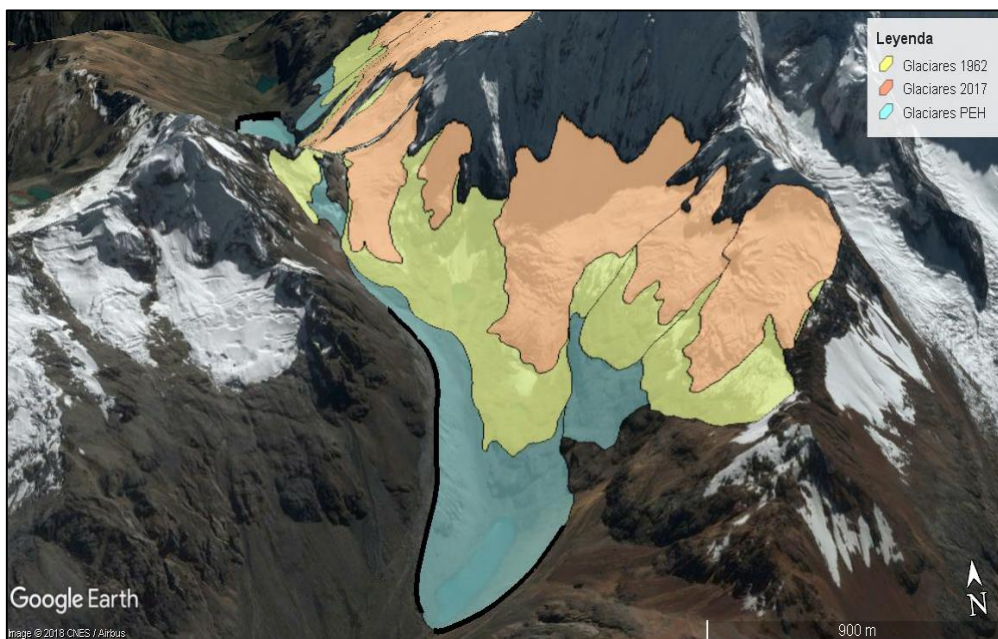


Figura 6. Identificación de los glaciares de la PEH a partir de cordones morrénicos.

#### 3.4.1.4. *Cálculo volumétrico glaciar del año 2017 y la estimación del lecho basal.*

El volumen glaciar para el año 2017, se estima mediante la aplicación de la metodología “*Glacier Bed Topography*” (GLABTOP) en el entorno ARCGIS, descrita en Linsbauer et. al. (2012). Esta metodología asume que la superficie actual del glaciar es reflejo de la topografía basal, tomando en consideración parámetros físicos que influyen sobre la dinámica glaciar como la fuerza de oposición al desplazamiento glaciar, la pendiente, densidad y gravedad.

El diagrama de flujo de la Figura 7, resume las entradas y salidas de la metodología GLABTOP.

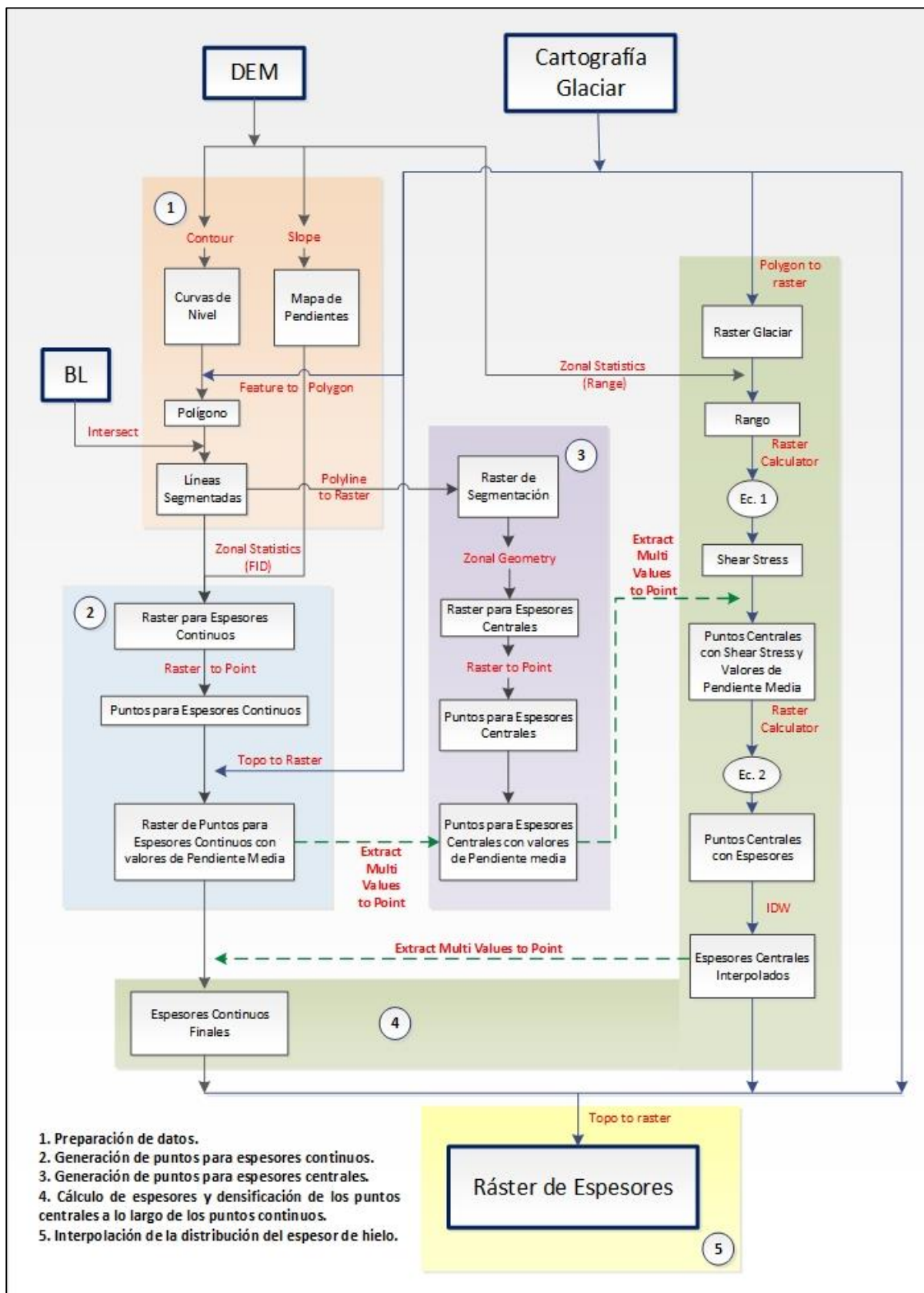


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología GLABTOP. (Linsbauer et. al.,2012)

Las elipses azules representan las entradas principales del método, cada grupo de color representa el orden de las acciones a realizar, los textos rojos sobre las flechas son funciones

sistematizadas del ArcGIS y los círculos son ecuaciones utilizados en el procesamiento de datos, los rectángulos denotan las salidas o datos resultantes y la elipse roja representa el resultado final.

Las variables de entrada para este método son:

- 1.-La cartografía de los glaciares del año 2017 (contorno glaciar).
- 2.-Un Mapa de Elevación Digital del área de estudio (DEM)
- 3.-Un conjunto de líneas centrales digitalizadas manualmente en los glaciares, denominado *Branch Line*.

El contorno glaciar o cartografiado son polígonos que representan la extensión de los glaciares, estos polígonos son delimitados en el programa Google Earth Pro e importados a la plataforma ArcGIS para su corrección y procesamiento.

Un DEM (modelo de elevación digital), es obtenida de una imagen del satélite PLEIADES y permite generar un mapa de pendientes del área de estudio.

Las *Branch Line*, son un conjunto de ramales digitalizados y adaptados al relieve, en el que se distingue un desnivel topográfico sobre la pendiente superficial del glaciar.

Las funciones sistematizadas del ArcGIS para el procesamiento de datos son:

1. “Slope” (Pendientes)
2. “Contour” (Contorno)
3. “Feature to Polygon” (De entidad a Polígono)
4. “Intersect” (Intersecar)
5. “Zonal Statistics” (Estadísticas Zonales)
6. “Raster to Point” (De Ráster a Punto)
7. “Topo to Raster” (De topo a Ráster)
8. “Polygon to Raster” (De polígono a Ráster)
9. “Zonal Geometry” (Geometría Zonal)

10. “Extract Multi Values to Point” (Extraer valores múltiples a puntos)

11. “Raster Calculator” (Calculadora Ráster)

12. “Inverse distance weighting - IDW” (Distancia Inversa Ponderada)

“*Slope*” identifica la pendiente (gradiente o inclinación) de cada celda de un ráster.

“*Contour*” crea una clase de entidad de línea de curvas de nivel (isolíneas) a partir de una superficie de ráster.

“*Feature to Polygon*” crea una clase de entidad que contiene polígonos generados a partir de áreas encerradas por entidades de polígono o por líneas.

“*Intersect*” calcula la intersección geométrica de las entidades de entrada. Las entidades que son comunes a todas las entradas, es decir intersecan, se escribirán en la clase de entidad de salida.

“*Zonal Statistics*” calcula estadísticas sobre valores de un ráster dentro de zonas de otro conjunto de datos.

“*Raster to Point*” convierte un conjunto de datos ráster a entidades de punto.

“*Topo to Raster*” es un método de interpolación diseñado específicamente para la creación de modelos digitales de elevación (DEM).

“*Polygon to Raster*” convierte las entidades de polígono a un conjunto de datos ráster.

“*Zonal Geometry*” devuelve información acerca de la geometría o la forma de cada zona en un ráster.

“*Extract Multi Values to Point*” extrae valores de celda en ubicaciones especificadas en una clase de entidad de punto desde uno o más rásteres y registra los valores en la tabla de atributos de la clase de entidad de punto.

“*Raster Calculator*” construye y ejecuta una expresión simple de álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python, además de ecuaciones proporcionadas por el usuario.

“IDW” (Inverse distance weighting) interpola mediante la distancia inversa ponderada los valores de celda a través de una combinación lineal de un conjunto de puntos de muestra.

Las ecuaciones utilizadas para el procesamiento de datos son:

1. “Ec 1”. Ecuación 1.
2. “Ec 2”. Ecuación 2.

La ecuación 1 se utiliza para el cálculo del esfuerzo cortante o *Shear Stress* ( $\tau$ ), realizado a partir de las variaciones de los rangos de elevaciones ( $\Delta h$ ) de la siguiente manera:

$$\tau = 0.005 + 1.598\Delta h - 0.435\Delta h^2$$

Donde:

$\tau$ : es el esfuerzo cortante o *Shear Stress*

$\Delta h$ : es la variación de altura del glaciar (*Rango*).

La ecuación 2 es usada para calcular la profundidad o espesor de los glaciares y se realiza a partir de la ecuación 1, la densidad, la gravedad y el factor de forma de la siguiente manera:

$$e = \frac{\tau}{\rho g f \sin \alpha}$$

Donde:

$e$ : espesores de los glaciares del año 2017,

$\tau$ : es el esfuerzo cortante o Shear Stress,

$\rho$ : es la densidad del hielo (900 kg/m<sup>3</sup>),

$g$ : es la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>), y

$f$ : es el factor de forma (aquí se establece la constante de 0.8)

$\alpha$ : es el ángulo de la pendiente media expresada en radianes.

Cabe precisar que el factor de forma ( $f$ ), se refiere a la relación entre el área de la sección transversal del glaciar, su perímetro y la fricción de un glaciar real con las paredes del valle.

Las salidas o datos resultantes son:



1. Mapa de pendientes.
2. Curvas de Nivel.
3. Polígono.
4. Líneas Segmentadas.
5. Ráster para Espesores Continuos.
6. Puntos para Espesores Continuos.
7. Ráster de Puntos para Espesores Continuos con valores de la Pendiente Media.
8. Ráster de segmentación.
9. Ráster para Espesores Centrales.
10. Puntos para Espesores Centrales.
11. Puntos para Espesores Centrales con valores de la Pendiente Media.
12. Ráster Glaciar.
13. Rango.
14. Shear Stress.
15. Puntos centrales con Shear Stress y valores de Pendiente Media.
16. Puntos Centrales con Espesores.
17. Espesores Centrales Interpolados.
18. Espesores Continuos Finales.

El *mapa de pendientes* es el resultado de aplicar la función “*Slope*” al DEM, en él se muestran las variaciones de altura existentes en el área.

Las *curvas de nivel* son el resultado de la aplicación de la función “*Contour*” al DEM y nos muestra la altitud sobre el nivel del mar en cada punto.

El *Polígono* es el resultado de las curvas de nivel y los contornos glaciares aplicando la función “*Feature to Polygon*”.

Las *Líneas de Segmentación*, intersecan las *Branch Line* o líneas de ramificación con el *Polígono* de las *Curvas de Nivel* y los glaciares, mediante la función “*Intersect*”.

El *Ráster de espesores continuos*, son puntos generados estadísticamente dentro de las *Líneas de Segmentación* con el *Mapa de Pendientes* utilizando la función “*Zonal Statistics*”.

Los *Puntos para espesores continuos*, es el ráster anterior en formato de puntos con la función “*Raster to Point*”.

El *Ráster de Puntos para Espesores Continuos* contiene valores de la pendiente media utilizando la función “*Topo to Raster*” en los *Puntos para Espesores Continuos* con la *Cartografía Glaciar*.

El *Ráster de Segmentación* fue pasado a formato ráster con la función “*Polygon to Raster*”.

El *Ráster para Espesores Centrales* contiene los puntos centrales de cada *Branch Line* segmentada por las curvas de nivel, mediante la función “*Zonal Geometry*”.

Los *Puntos para Espesores Centrales*, es el formato de puntos del *Ráster para Espesores Centrales* mediante la función “*Raster to Point*”.

Los *Puntos para Espesores Centrales* adoptan valores de la pendiente media del *Ráster de Puntos para Espesores Continuos* con valores de la *Pendiente Media* con la función “*Extract Multi Values to Point*”.

El *Ráster Glaciar* es el formato ráster de la cartografía glaciar aplicando la herramienta “*Polygon to Raster*”.

El *Rango* es la diferencia entre los valores máximos y mínimos en cada zona con la aplicación de la función “*Zonal Statistic*” y la opción “*Range*”.

El *Shear Stress*, es la fuerza que ejerce el glaciar sobre el lecho basal y que actúa tangencialmente al mismo, calculado mediante la ecuación (1) con la función “*Raster Calculator*”.

Los *Puntos Centrales con Shear Stress* y valores de la *Pendiente Media*, son el resultado de la extracción de información del *Ráster de Puntos para Espesores Continuos* con valores de la *Pendiente Media* mediante la función “*Extract Multi Values to Point*”.

Los *Puntos con Espesores Centrales* son los resultados de los cálculos de espesores de la ecuación (2) mediante la función “*Raster Calculator*”.

Los *Espesores Centrales Interpolados*, son el producto de la aplicación de la función “*IDW*” que interpola la superficie del ráster a partir de puntos con espesores centrales calculados.

Los *Espesores Continuos Finales* se obtiene por la extracción de datos del *Ráster de Puntos para Espesores Continuos* con valores de la *Pendiente Media* con los *Espesores Centrales Interpolados* utilizando la función “*Extract Multi Values to Point*”.

El *Ráster de Espesores* nos indica el cálculo volumétrico de los glaciares en su totalidad, es el resultado final de la interpolación de los *Espesores Continuos Finales*, *Espesores Centrales Interpolados* y la *Cartografía Glaciar*.

La implementación del procedimiento del diagrama de flujo de la Figura 7, se realizó mediante cinco (05) acciones:

- 1.- Preparación de datos.
- 2.- Generación de puntos para espesores continuos.
- 3.- Generación de puntos para espesores centrales.
- 4.- Cálculo de espesores y densificación espacial de los puntos centrales a lo largo de los puntos continuos.
- 5.- Interpolación de la distribución del espesor del hielo.

La preparación de los datos (acción 1), requirió del cartografiado glaciar (contorno glaciar), un Mapa de Elevación Digital (DEM) y la digitalización Branch Line.

La digitalización de las *Branch Line*, se basan en la identificación geomorfológica de un mapa de pendiente con un relieve diferenciado visualmente por colores elaborado a partir del *DEM*, estas líneas se intersecan a las *Curvas de Nivel* con una equidistancia de 50 m y de forma perpendicular, calculadas a partir del *DEM* mediante la función *Contour*.

El *Mapa de Pendiente* deriva del *Mapa de Elevación Digital (DEM)* mediante la función *Slope*, el *DEM* refleja varias estructuras topográficas de pequeña escala en la superficie del glaciar (grietas, seracs, morrenas, etc.), que puede tener una influencia en el valor de la pendiente calculada y, por lo tanto, debe suavizarse mediante un filtro visual variable, siguiendo la ruta *Properties» Display» Bilinear Interpolation (For Continuous Data)* en el software ArcGIS.

Las *Branch Line* se convierten a celdas ráster de 100 m, segmentándola en sectores de 50 m de rango de elevación e intersecándola con las *Curvas de Nivel* mediante la opción *Intersect* en el entorno ArcGIS, a fin de obtener segmentaciones dentro del glaciar.

Para calcular los espesores, se necesita crear celdas continuas al contorno de las *Branch Line* y celdas centrales entre las *Branch Line* con las *Curvas de Nivel*.

En la acción 2 se generaron los *Puntos para Espesores Continuos*, calculando estadísticamente puntos dispersos a lo largo de las *Branch Line* conteniendo valores del *Mapa de Pendiente* e interpolados con la *Cartografía Glaciar* del año 2017.

En la acción 3 se generaron los *Puntos para Espesores Centrales*, cada sector de la pendiente media se calcula a partir de la cuadrícula de la pendiente suavizada, asignándole un punto central dentro de las *Branch Line* segmentadas con las *Curvas de Nivel*, mediante la función *Zonal Geometry-Centroid*. Este *Ráster para Espesores Centrales* se pasó a formato de puntos para poder extraer en él los datos de la pendiente media del *Ráster de Puntos para Espesores Continuos*.

Para la acción 4 se procede a calcular los espesores y densificación espacial de los puntos centrales a lo largo de los puntos continuos, necesitando para ello la *Cartografía Glaciar* en formato ráster para que a partir de la variación del rango de elevaciones ( $\Delta h$ ) se obtenga el cálculo del *Shear Stress* usando la ecuación (1).

De los resultados, se extraen los valores del *Shear Stress* correspondientes a los puntos de espesores centrales con la opción *Extract Multi Values to Point* y se les multiplica por 100000 para cambiar la unidad de medida a Pascal (Pa).

Obtenidos los *Puntos Centrales con valores de Shear Stress y Pendiente Media* en cada punto aplicamos la ecuación 2, que convierte estos puntos a vectores asignándoles un valor de espesor.

Para calcular los valores continuos de espesores, se calculan valores de espesor adicionales entre los puntos centrales, aplicando una interpolación de distancia inversa ponderada (*IDW*), con la configuración estándar (radio: 5 veces el tamaño de la celda, número mínimo de puntos: 2, potencia: 2). Consiguiendo así una cuadrícula interpolada con los valores de los espesores centrales y continuos dispersos, luego se extrajo estos valores al ráster de puntos para espesores continuos.

En la acción 5 se realiza una interpolación con la opción *Topo to Raster* en el entorno ArcGIS, que utiliza los valores de los *Espesores Centrales Interpolados*, *Espesores Continuos Finales* obtenidos en la acción anterior, y la *Cartografía Glaciar* que actúan como líneas de corte para la interpolación y tienen una elevación de 0 m., obteniendo así los valores de espesores para cada glaciar de la cordillera Huayhuash.

Finalmente, los valores de espesores obtenidos permiten estimar el volumen total de los glaciares del año 2017, seleccionando la ruta *Propiedades» Simbología» Clasified» Classification» Classification Statistics* en ArcGIS.

Así mismo, para estimar la superficie del lecho basal, se restó el volumen del *DEM* original con el de los glaciares del año 2017, obteniendo un *DEM* sin glaciares, es decir, la topografía del lecho basal. Cabe precisar que el *DEM* del lecho basal servirá de entrada en la herramienta “*GLARE*” para el cálculo del volumen paleoglaciario.

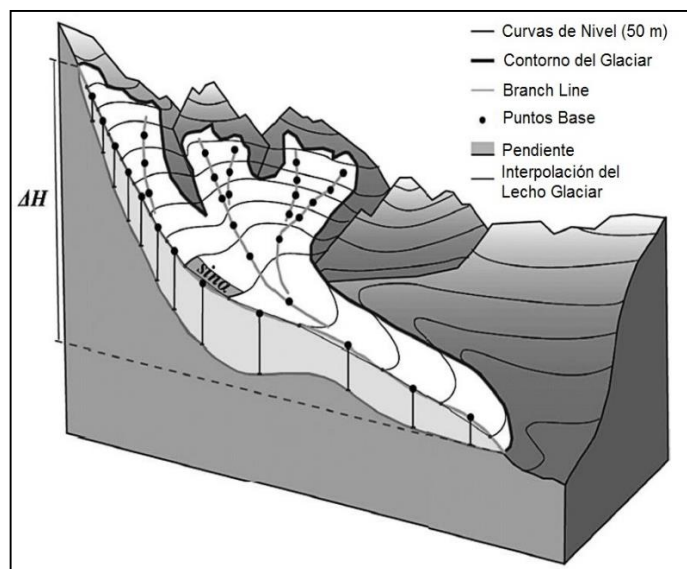


Figura 8. Parámetros utilizados en la metodología GLABTOP.

#### 3.4.1.5. **Reconstrucción volumétrica Glaciar del año 1962 y PEH.**

La reconstrucción del volumen glaciar del año 1962 y paleoglaciario de la PEH, se realiza aplicando la herramienta “Glaciar Reconstruction” (GLARE), propuesta por Pellitero et al., (2016), a partir de líneas de flujo que simulan el recorrido glaciar en el pasado, estas líneas consideran los mismos valores de los parámetros físicos (altura ( $h$ ), pendiente media ( $\alpha$ ), gravedad ( $g$ ), densidad del hielo ( $\rho$ ), esfuerzo cortante ( $\tau$ )) de la metodología GLABTOP, además de la topografía del lecho basal obtenida en el punto 3.4.1.4 (Cálculo volumétrico glaciar del año 2017 y la estimación del lecho basal.)

Esta herramienta reconstruye semiautomáticamente los espesores de cada glaciar mediante la ecuación (2). Sin embargo, el valor de factor de forma estándar es de 0.8, por lo que fue necesario la identificación de las morrenas laterales a fin de aplicar la corrección del factor de forma.

Para el caso de los espesores del año 1962 se realizó mediante un análisis del perfil topográfico, siguiendo la ecuación propuesta por Nye (1952b):

$$\text{Factor } (f) = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro} \cdot \text{Altura}}$$

Dónde:

*Área:* Es el área transversal hasta la morrena más alta dentro del perfil topográfico.

*Perímetro:* Es la longitud de la sección transversal de contacto entre el hielo y el lecho glaciar

*Altura:* Se calcula desde lecho basal más bajo hasta la morrena más alta dentro del perfil topográfico.

Para el caso de los espesores de la PEH se realizó mediante la propuesta de Nye (1965), que considera que si el *factor de forma (f)* resultante del análisis del perfil topográfico los paleoglaciares la PEH es menor de 0.445, se utilizará este último valor como nuevo factor de forma para el cálculo de los espesores finales de la PEH.

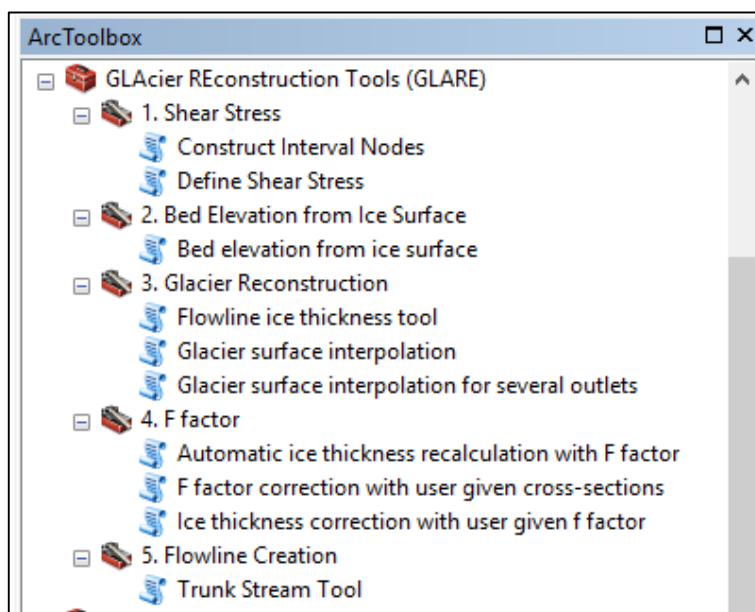


Figura 9. Herramientas GLARE (Pellitero et al., 2016).

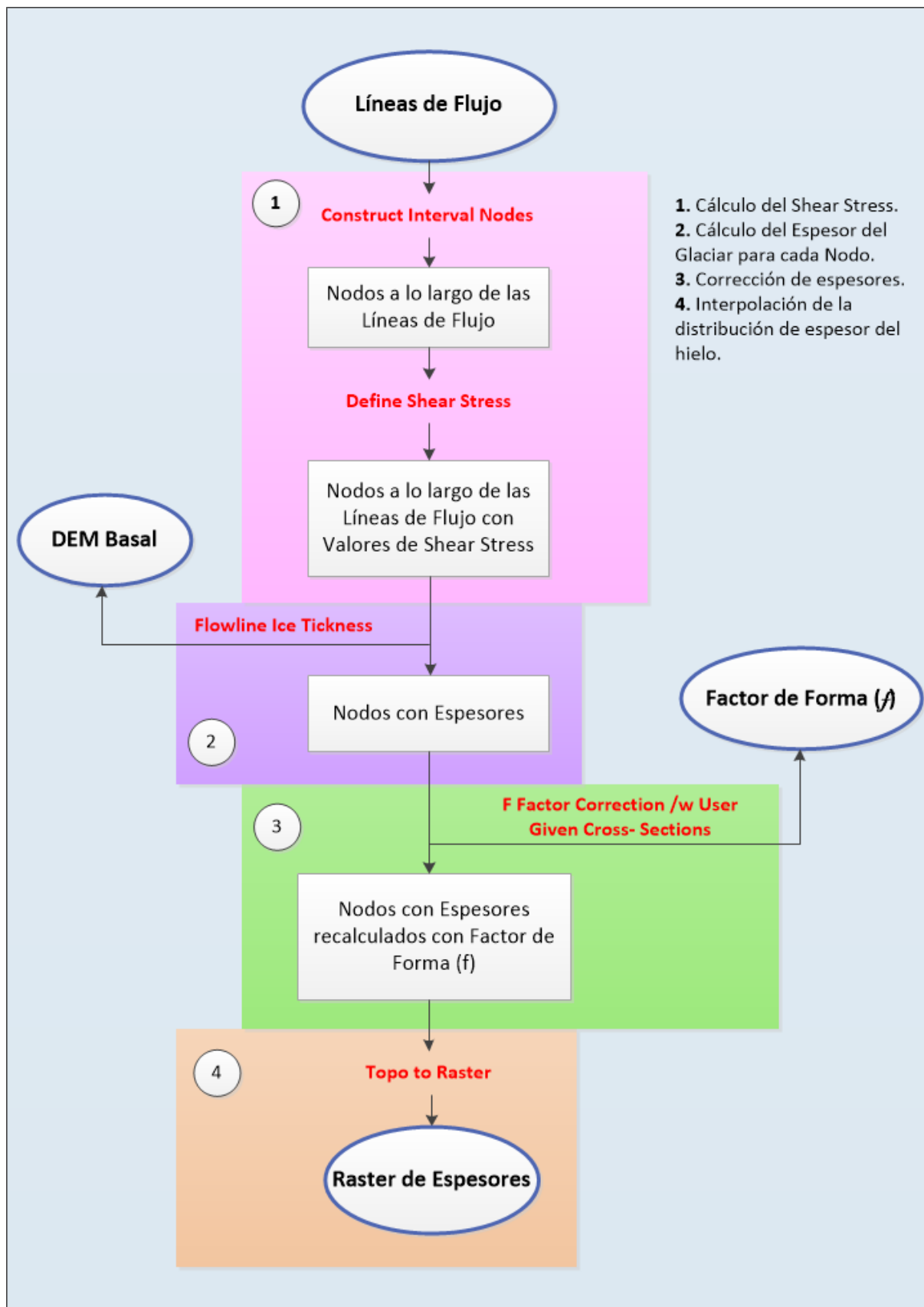


Figura 10. Diagrama que muestra el uso del GLARE.



En la Figura 10 los círculos azules representan las variables de entrada, los textos en rojo son las funciones sistematizadas de la herramienta y del ArcGIS, utilizadas en el procesamiento de datos, los rectángulos azules son las salidas o resultados de cada proceso y el círculo verde, es el resultado final.

Las variables de entrada para este método son:

- 1.- Flow Line.
- 2.- DEM del lecho basal.
- 3.- Factor de forma ( $f$ ).

Las *Flow Line*, son líneas de flujo del glaciar y representan el sentido de flujo que pudieron haber tenido los paleoglaciares, dependiendo de la morfología del paleoglaciar la extensión y el orden de tributarios de cada línea.

El *DEM del lecho basal* es obtenido de la reconstrucción volumétrica del año 2017, este DEM sirve para estimar la topografía glaciar para cada escenario (año 1962 y PEH).

El *Factor de Forma ( $f$ )*, es un enfoque más sofisticado y geoméricamente correcto, siendo una función del área de la sección transversal y la longitud del perímetro, es decir, una función de la anchura y espesor del glaciar. Este enfoque fue adoptado por Benn y Hulton (2010).

Las funciones automatizadas utilizadas de la herramienta son:

1. *Construct Interval Nodes* (Construcción de intervalos de Nodos)
2. *Define Shear Stress* (Definición del esfuerzo cortante).
3. *Flowline ice thickness tool* (Espesor del Hielo en la Línea en Flujo)
4. *Ice thickness correction with user given  $f$  factor* (Factor de Corrección ( $f$ ) de la Sección Transversal).
5. *Glacier Surface Interpolation* (Interpolación de la Superficie Glaciar)

*Construct Interval Nodes* (Construcción de intervalos de Nodos), convierte cada *Flow Line* a un grupo de nodos, los cuales almacenan los datos de los siguientes procesos.

*Define Shear Stress* (Definición del esfuerzo cortante), proporciona datos del esfuerzo cortante a cada grupo de nodo.

*Flowline ice thickness tool* (Espesor del Hielo en la Línea en Flujo), calcula los espesores del glaciar en cada nodo utilizando la ecuación (2) empleada en la metodología GLABTOP.

*Ice thickness correction with user given f factor* (Factor de Corrección (f) de la Sección Transversal), permite al usuario ingresar el *Factor de Forma* (f) corregido para volver a realizar el cálculo de los espesores en cada nodo.

*Glacier Surface Interpolation* (Interpolación de la Superficie Glaciar), estima el volumen de los glaciares usando la función *Topo to Raster*, tomando como dato de entrada los nodos con valores de espesores corregidos.

Las salidas o datos resultantes son:

1. Nodos a lo largo de las líneas de flujo
2. Nodos a lo largo de las líneas de flujo con valores del Shear Stress.
3. Nodos con espesores
4. Nodos con espesores recalculados con el factor de forma (f)
5. Ráster de Espesores.

Los *Nodos a lo largo de las líneas de flujo*, resultan de la función *Construct Interval Nodes*. En estos nodos serán almacenados los datos resultantes de los procedimientos posteriores.

Los *Nodos a lo largo de las líneas de flujo con valores del Shear Stress*, requiere de variables de entre 5000 kPa y 10000 kPa. Ingresamos los valores mediante la función *Define Shear Stress*.

Los *Nodos con valores de espesores*, requiere de los nodos con valores de *Shear Stress*. Estos valores de espesores son ingresados a los nodos, aplicando la función *Flowline ice thickness tool*.

Los *Nodos con espesores recalculados con el factor de forma (f)*, requiere ingresar un nuevo factor de forma representativo para corregir los valores de espesores para cada nodo, mediante la función *Ice thickness correction with user given f factor*.

La salida final obtenida es un *Ráster de Espesores*, es decir, el volumen de los glaciares del año 1962 y la PEH respectivamente.

La implementación del procedimiento del diagrama de flujo de la *Figura 10*, se realizó mediante cuatro (04) acciones:

- 1.- Cálculo del *Shear Stress* (Esfuerzo Cortante).
- 2.- Cálculo del espesor del glaciar para cada nodo.
- 3.- Corrección de espesores.
- 4.- Interpolación de la distribución del espesor del hielo.

Para el *Cálculo del Shear Stress* (acción 1), se requirió convertir cada *Flow Lines* a un grupo de nodos mediante la función *Construct Interval Nodes*, luego se asignaron los valores de *Shear Stress* utilizando la función *Define Shear Stress*.

La obtención del valor del *Shear Stress*, consideró variables con valores de 5000 kPa para glaciares del año de 1962, para glaciares de la PEH el valor de la variable fue de 5000 kPa en nodos sobre áreas con sedimentos y 10000 kPa en nodos sobre rocas.

Con los nodos con valores asignados de *Shear Stress*, se procede a calcular los espesores para cada nodo (acción 2), mediante la función *Flowline ice thickness tool*. Los valores obtenidos de los espesores para cada nodo, utilizaron el valor del *factor de forma (f)* predeterminado de 0.8, usado generalmente para glaciares actuales. Sin embargo, es necesario

corregir el valor del *factor de forma* usando un valor que corresponda a la geomorfología del glaciar para el año 1962 o para la PEH (acción 3).

La corrección del *factor de forma* ( $f$ ) para glaciares del año 1962, se realizó mediante la ecuación propuesta por Nye (1952b):

$$\text{Factor } (f) = \frac{A}{P \cdot h}$$

Dónde:

$A$ : Área transversal del perfil topográfico.

$P$ : Longitud de la sección transversal de contacto entre el hielo y el lecho glaciar

$h$ : Altura del hielo, se calcula desde lecho basal más bajo hasta la morrena más alta dentro del perfil topográfico.

Para corregir el valor del *factor de forma* ( $f$ ) de paleoglaciares de la PEH, se considera que si el *factor de forma* ( $f$ ) resultante de la ecuación es menor a 0.445, utilizará este valor como factor de corrección. (Nye, 1965)

El nuevo *factor de forma* ( $f$ ) es ingresado en la función *Ice thickness correction with user given f factor*, obteniendo de este modo nuevos espesores para cada nodo con el valor del factor de forma correspondiente.

Con los *Nodos con espesores recalculados con factor de forma* ( $f$ ), se procede a interpolar los datos mediante la función *Topo to Raster* en el entorno ArcGIS, a fin de obtener los espesores totales de los glaciares del año 1962 y de la PEH.

Finalmente, con el *DEM del lecho basal* y el *Ráster de Espesores* de cada año se obtiene el DEM del volumen total mediante la función *Raster Calculator*, para el año 1962 y para la PEH respectivamente.

#### 3.4.1.6. *Cálculo de la ELA y PaleoELAs para el año 2017, 1962 y la PEH.*

La Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) es el parámetro que expresa mejor la evolución de los glaciares como indicador sensible de los cambios en el clima, una forma de

estimar su valor es aplicando el métodos Área x Altitud x Balance Ratio (AARB), este método se basa en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan por encima o por debajo de la ELA, requiriendo de la hipsometría del glaciar y la relación de equilibrio (BR), este último elemento explica las diferencias entre los gradientes de acumulación y ablación y su respectiva contribución al balance de masa de los glaciares. (Pellitero et al. ,2015)

Con el método AABR, es posible reconstruir además de ELAs actuales, las ELAs del pasado o paleoELAs, aplicando para ello el ArcToolbox o caja de herramientas ELA\_Calculation, desarrollada por Pellitero et al. (2015).

La ELA\_Calculation, al ser una herramienta automatizada, proporciona cálculos rápidos para conjuntos de datos de glaciares únicos o múltiples. Su implementación requiere como elemento de entrada los DEM de la superficie glaciar actual y de las superficies reconstruidas de los paleoglaciares, obtenidos en la reconstrucción volumétrica glaciar, debido a que la metodología AABR está en función de la altura y la topografía glaciar. (Osmaston, 2005)

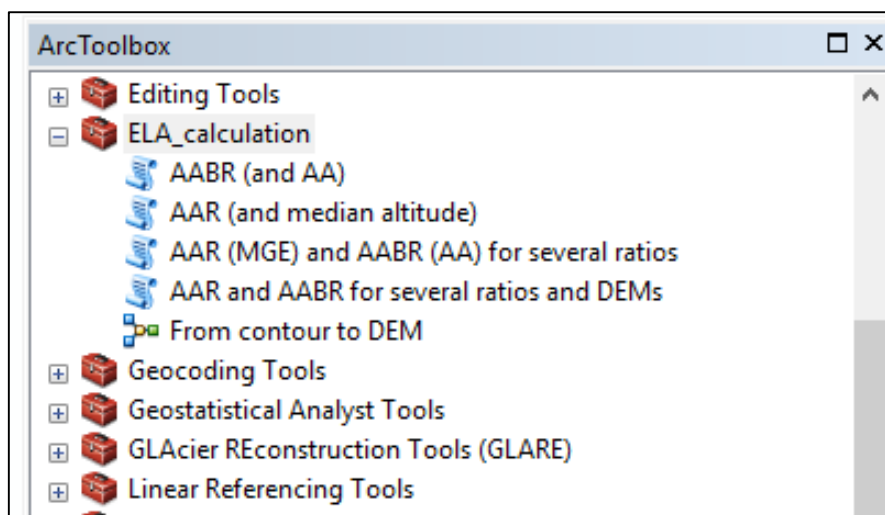


Figura 11. Herramientas del ELA\_Calculation.

Dentro de la herramienta ELA\_calculation, se encuentra la función *AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios*, al aplicarlo se obtuvieron como elemento de salida los valores estimados de ELAs para diferentes ratios, guardados en un archivo de texto denominado "ELA\_values\_AAR\_and\_AABR.txt".

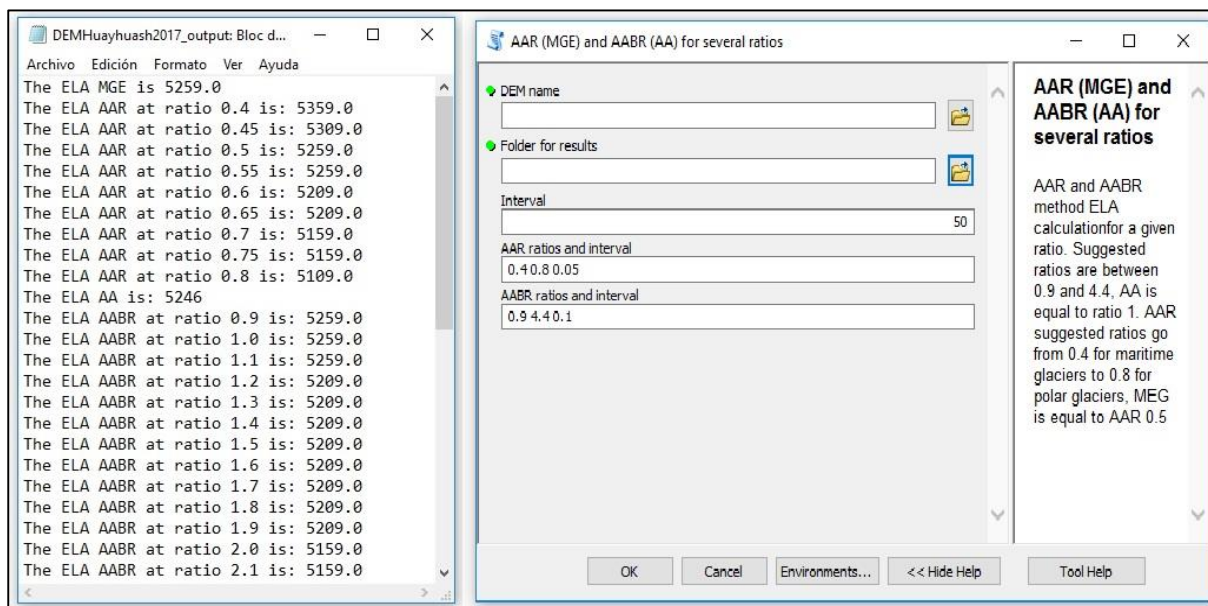


Figura 12. Archivo de texto con valores de las ELAs (Izquierda), Herramienta ELA-AABR (Derecha).

El cálculo de las ELAs AABR en los diferentes periodos (PEH, 1962 y 2017), necesitó de un BR (Balance Ratio) representativo de las gradientes de la zona de acumulación y la zona de ablación, es decir, fue necesario derivar un BR a partir de un glaciar cercano y asumir que el balance de masas es controlado por condiciones climáticas y glaciológicas similares.

En ese sentido, se utilizaron los valores obtenidos del monitoreo del glaciar Artesonraju en la cordillera Blanca para el año 2016 – 2017, realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), donde los valores asumidos para la ELA y el balance ratio fueron de 5049 m.s.n.m. y 1.92 respectivamente, a fin de tener valores representativos para el cálculo de ELAs en los diferentes periodos.

Cabe precisar que la función *AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios*, de la herramienta *ELA\_Calculation*, proporciona también un *Shapefile* de la ELA para cada DEM, importado en la plataforma ArcGIS para su posterior análisis comparativo.

#### 3.4.1.7. *Estimación de la variación de la temperatura*

De la reconstrucción de las ELAs se va a deducir un enfriamiento climático con respecto al clima actual: cuanto más frío que hoy en día era el clima, antes de finales del siglo XVIII (Úbeda, 2011).

La evaluación del enfriamiento del clima desde el último avance de los glaciares al presente, requiere del ensayo de un método que consiste en relacionar el desnivel entre ELAs y paleo ELAs (m) de los glaciares con el gradiente térmico vertical de la temperatura del aire, es decir relaciona el valor del enfriamiento con el gradiente térmico vertical de la temperatura del aire (valor global medio de la Tierra  $GTV=6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ). La ecuación fue propuesta por Úbeda (2011).

$$\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$$

Dónde:

$\Delta T$ : Variación de la temperatura,

$\Delta ELA$ : Variación de la ELA o PaleoELA,

$GTV$ : Valor global medio de la Tierra.

El producto  $GTV \cdot \Delta ELA$  permite deducir el enfriamiento del clima con respecto al presente (Temperatura en grados Celsius), con el cual es posible determinar la influencia del calentamiento global en la desglaciación de los glaciares de la cordillera Huayhuash.

### 3.4.2. Descripción de los instrumentos

Se utilizarán herramientas de Información como:

**Google Earth:** Software de información geográfica que permite trabajar imágenes satelitales a través de la digitalización de líneas, puntos y polígonos. Una de las ventajas de esta herramienta es que permite exportar una digitalización a programas como ArcGIS. La aplicación de esta herramienta permite la identificación de glaciares actuales y sus formas geomorfológicas.

**ArcGIS:** Software de información geográfica que permite geo-referenciar imágenes satelitales, obtener mapas de pendientes a partir de un DEM e interpolar mapas volumétricos, con data de un área de estudio determinado. Además, permite importar archivos de Google Earth.

**Glacier Reconstruction Tools (GLARE):** Herramienta que permite la reconstrucción Paleoglaciaria, está programada en Python 2.7 y utiliza principalmente bibliotecas *Python numpy* y *arcpy*, que se instalan automáticamente junto con el software ArcGIS (ejecutar en ArcGIS 10.1 y las actualizaciones posteriores). Es posible descargar esta herramienta del repositorio GitHub de *Computers and Geosciences* en <https://github.com/cageo/Pellitero-2015>, o desde la página del grupo de investigación de Younger Dryas en el sitio web de la Universidad de Aberdeen: <http://www.abdn.ac.uk/geociencias/departamentos/geographyenvironment/outcomes-442.php>.

**ELA\_Calculation\_toolbox:** Herramienta automatizada para el cálculo de la ELA en paleoglaciares, está codificada en Python (Lenguaje de programación). Las herramientas siguen el procedimiento de Osmaston (2005) para el AABR.

**Sistema de Posicionamiento Global (GPS):** Sistema mediante el cual es posible establecer la posición en coordenadas de latitud y longitud en el área de estudio.

### 3.5. Técnicas para el procesamiento de la información

Las técnicas para el procesamiento de la información se basan en la observación, análisis e interpretación geomorfológica del área de estudio y la correcta aplicación de las ecuaciones y herramientas que fundamentan el método aplicado.

#### 3.5.1. Cartografía y medida de la superficie de los glaciares del año 2017.

Ingresamos las Coordenadas  $-10.3029^{\circ}$  Latitud y  $-76.9035^{\circ}$  Longitud al programa Google Earth Pro, a fin de posicionarnos en el área de estudio luego, usando la opción *Historial de Imágenes*, ubicamos una imagen satelital del año 2017 en la que se realizó el cartografiado utilizando la opción *Polígono*.

La delimitación de los glaciares se realizó identificando geomorfológicamente el circo glaciar, las morrenas laterales y frontales sobre una Imagen Satelital Base del Instituto Geofísico del Perú, tomada el 17 de junio del año 2017. Para ello, se tuvo en



cuenta las capas de nieve que cubren las rocas, las zonas de sombra, los depósitos de avalanchas de nieve o rocas, la dirección del flujo glaciar por las vertientes de la montaña, las estructuras de las rimayas y grietas, la existencia de glaciares colgados que se encuentran por encima del acantilado, en la visión 3D que este software ofrece.

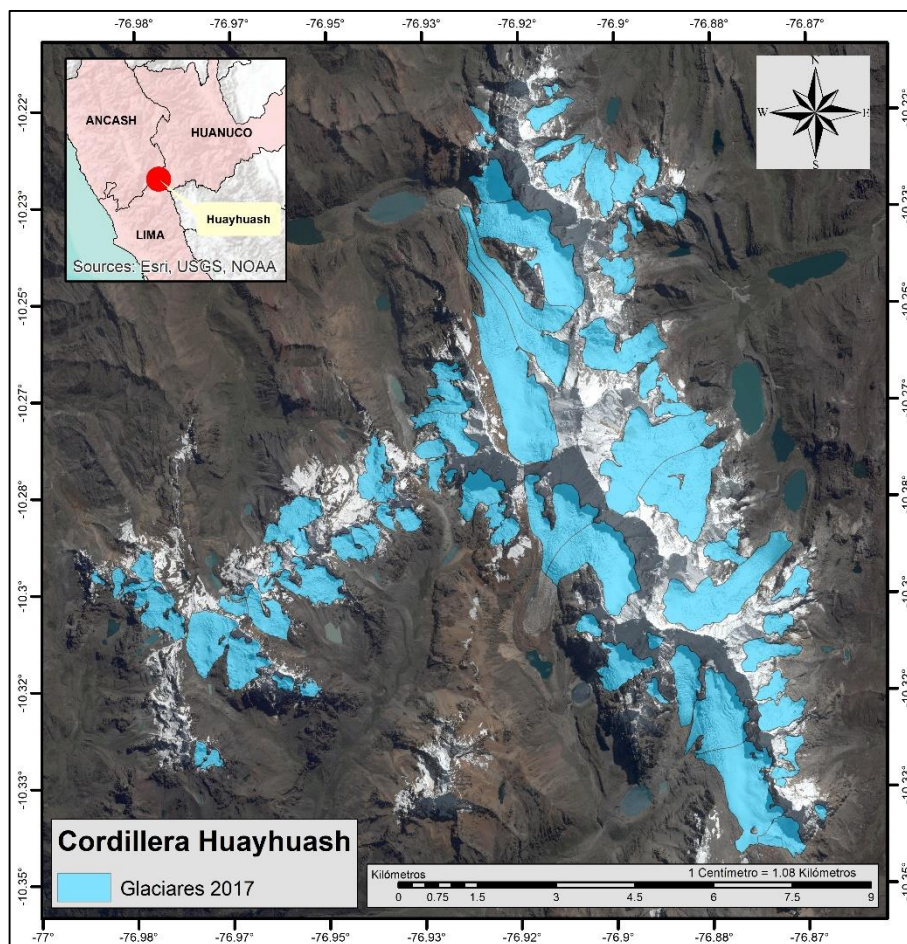


Figura 13. Cartografía de los glaciares de la cordillera de Huayhuash 2017.

El procedimiento para medir la superficie ( $\text{km}^2$ ) de los glaciares del 2017, inició por importar los polígonos digitalizados en el *Google Earth* (con extensión *KML*) al programa *ArcGIS* (con extensión *SHP*), para lo cual seleccionamos la opción *Arc Toolbox - From KML - KML to Layer*.

Cabe resaltar que al obtener la medida de la superficie de estos polígonos nos fue posible evaluar la desglaciación actual en función de la pérdida de superficie ( $\text{km}^2/\text{año}$ ) con respecto a la PEH y al año 1962.

### 3.5.2. Cartografía de los glaciares del año 1962.

Para la cartografía del año 1962, se georreferenciaron 27 fotografías aéreas en el programa *ArcGIS*, utilizando la función *Add Control Points* sobre una imagen satelital base tomada del Instituto Geofísico del Perú, ubicando puntos de referencia geomorfológicas en la imagen satelital base como en la fotografía aérea, a fin de que ésta última se amolde al área de estudio.

El procedimiento requirió de más de 100 puntos de control por cada fotografía aérea. Lograr una correcta georreferenciación implicó que coincidan los rasgos geomorfológicos de la fotografía aérea con los de la imagen satelital base.

Luego, las fotografías aéreas georreferenciadas fueron superpuestas en un archivo de nombre *Huayhuash1962* en formato “*tif*”, con la finalidad de definir hasta donde llegaron los glaciares en el año 1962 y posteriormente cartografiarlos para estimar el volumen, el área y las ELAs de los glaciares.

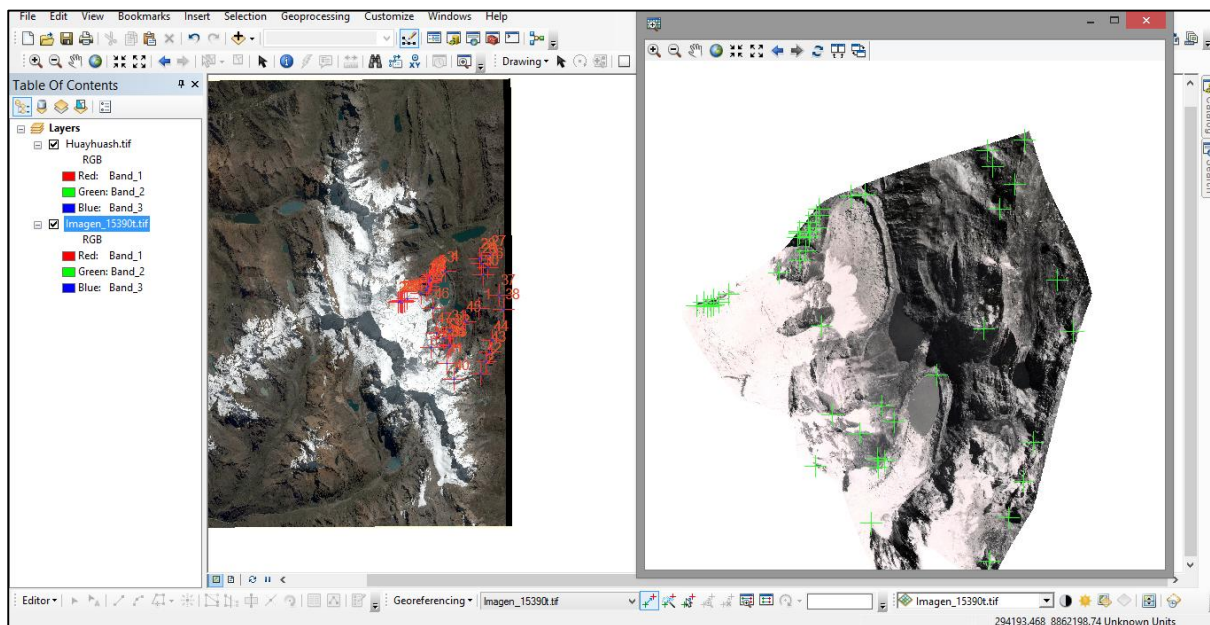


Figura 14. Proceso de georreferenciación de las Imágenes Satelitales de 1962.

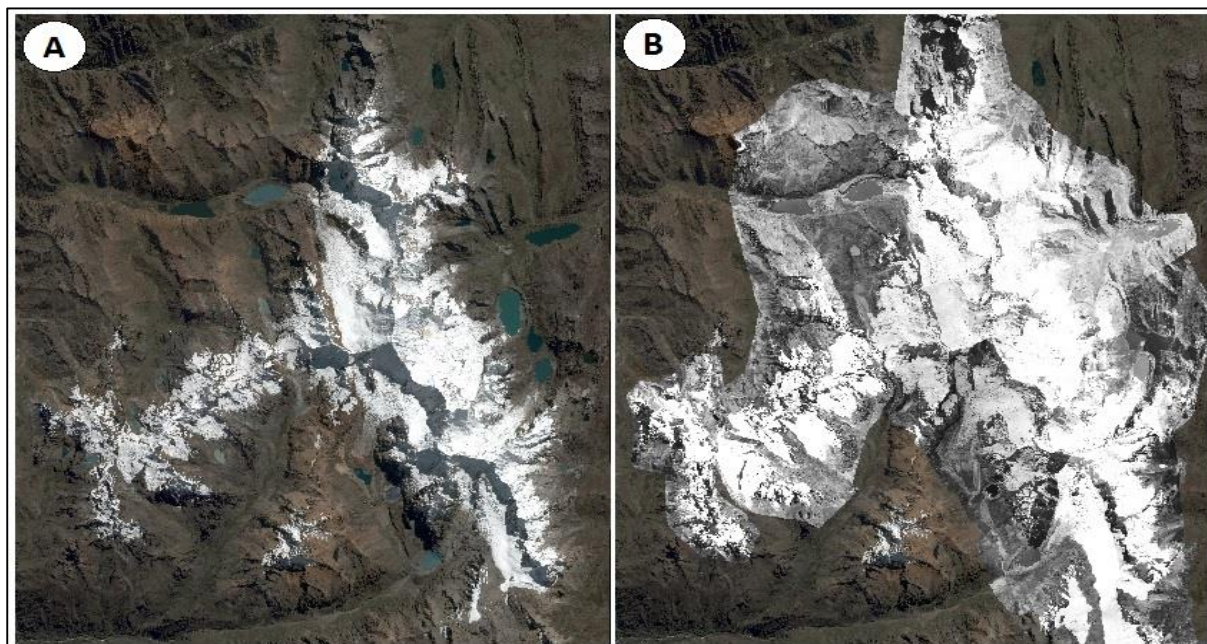


Figura 15. (A) Fotografía Satelital del 17 de junio del año 2017 de la cordillera Huayhuash. (B) Fotografías Georreferenciadas del año 1962.

Sobre la fotografía (B) de la Figura 15 se continuó con la delimitación, teniendo como base los glaciares del año 2017, seleccionando la ruta “*Edit Features*» *Create Features*» *Construction Tools*» *Auto Complete Polygon*”. Cabe mencionar que por la deformación que sufrieron las imágenes aéreas en la georreferenciación, el proceso de delimitación glaciar resultó complejo en ciertas áreas, donde el ángulo de la fotografía aérea tomada y la calidad de la misma no coincidían con el ángulo y la calidad de la imagen satelital. La corrección de estas distorsiones requirió del factor experiencia y la visión 3D del *Google Earth Pro*, para diferenciar las composiciones geomorfológicas (cárcavas, rimayas, morrenas, avalanchas, etc.) de la masa glaciar.

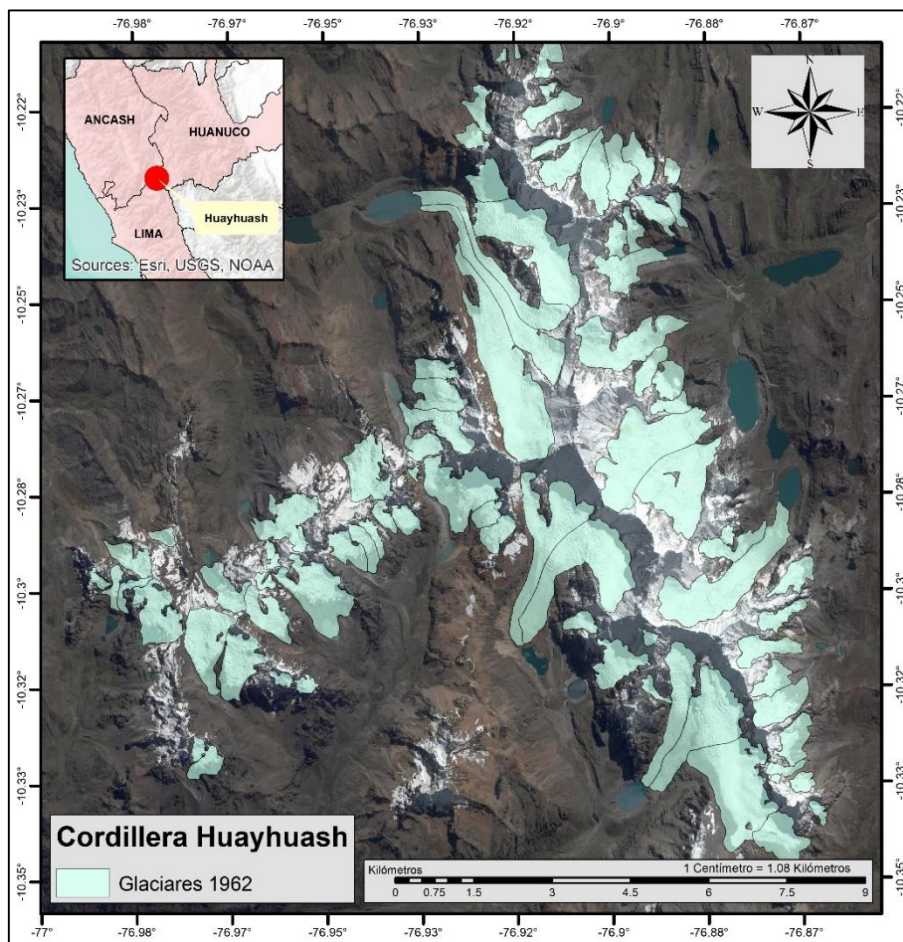


Figura 16. Cartografía de los glaciares de la cordillera de Huayhuash 1962.

### 3.5.3. Cartografía de los glaciares de la PEH (Paleoglaciares).

El cartografiado de los paleoglaciares, se basó en la identificación geomorfológica de cordones morrénicos que pertenecieron a la PEH, los cuales suelen encontrarse interrumpidos por algún evento geodinámico (sismos, derrumbes, avalanchas, erosión, etc.), ser confundidas con morrenas ocurridas en avances posteriores a la PEH o morrenas provocadas por el avance de lagos y lagunas.

La interpretación geomorfológica y el comportamiento del flujo glaciar fue fundamental para comprender el avance de los glaciares de la PEH por la vertiente del terreno, bajo este criterio se procedió a unir los glaciares cartografiados del año 1962 con los cordones morrénicos seleccionando “*Edit Features» Create Features» Construction Tools» Auto Complete Polygon*” en ArcGIS, obteniendo de este modo los paleoglaciares.

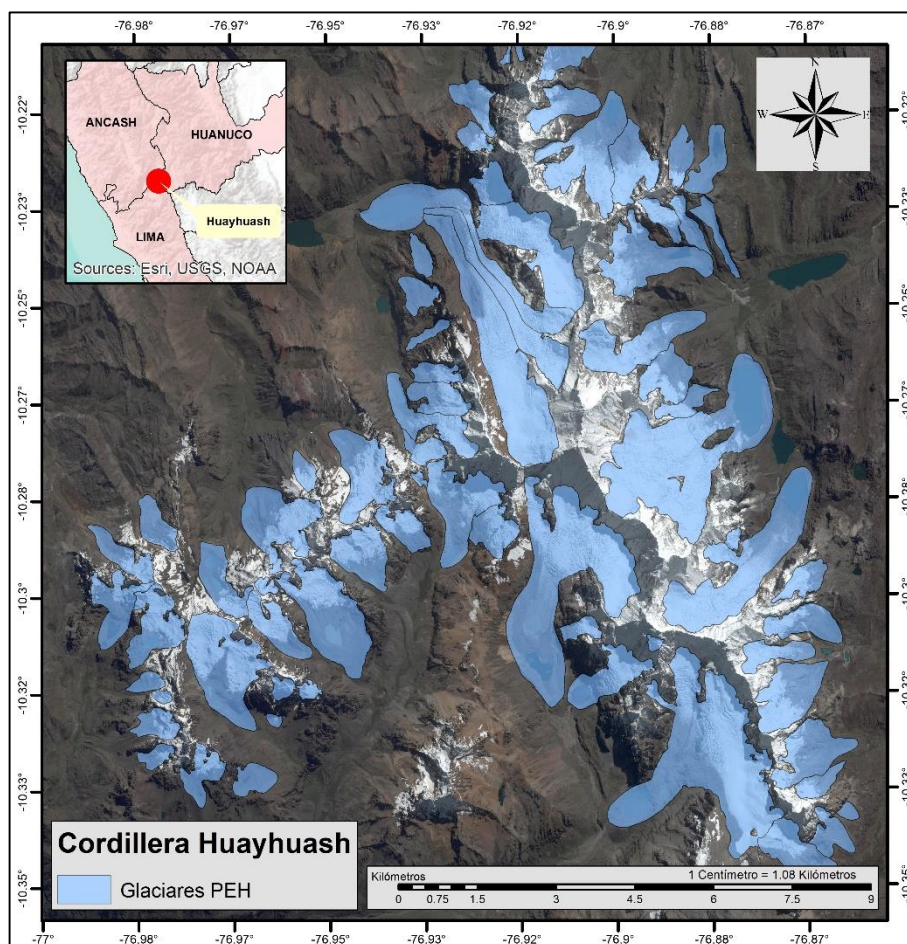


Figura 17. Cartografía de la Pequeña Edad de Hielo de la cordillera Huayhuash.

### 3.5.4. Cálculo volumétrico glaciar del año 2017 y la estimación del lecho basal.

Para el cálculo volumétrico glaciar, aplicamos la metodología GLABTOP, descrita en párrafos precedentes, para lo cual la información generada debió encontrarse georreferenciada en las coordenadas UTM WGS 84, en la Zona 18L.

La implementación del procedimiento para la aplicación de la metodología, detallada en el diagrama de flujo de la Figura 7. *Diagrama de flujo de la metodología GLABTOP*. (Linsbauer et. al.,2012), se realizó mediante cinco (05) acciones:

Preparación de datos (acción 1), requirió de entrada la *Cartografía Glaciar* del año 2017, un *Mapa de Elevación Digital (DEM)* de 6 m de espaciado, el mismo que detalla el desnivel de la superficie del área de estudio. Precisamos que el DEM utilizado fue tomado del satélite PLEIADES.

A fin de diferenciar las variaciones presentes en el terreno, fue necesario elaborar un *Mapa de Pendientes*, el mismo que se obtuvo mediante la función “*Slope*” aplicada al *DEM* en la plataforma ArcGIS.

El mismo *DEM* sirvió de entrada para obtener *Curvas de Nivel* de 50 m de equidistancia, mediante la aplicación de la función *Contour*.

El *Mapa de Pendientes* y las *Curvas de Nivel* obtenidos, sirvieron de entorno para la elaboración de las *Branch Line*, requiriendo el procedimiento de la vista 3D de Google Earth Pro, para diferenciar la dirección de la pendiente glaciar. Las *Branch Line* se dibujaron en zonas de pendiente dentro del glaciar y a su vez se intersecaron a las *Curvas de Nivel* de forma perpendicular. Se hizo necesaria la diferenciación de las pendientes, ya que hacia las laderas el espesor calculado es más sensible a los valores de la pendiente.

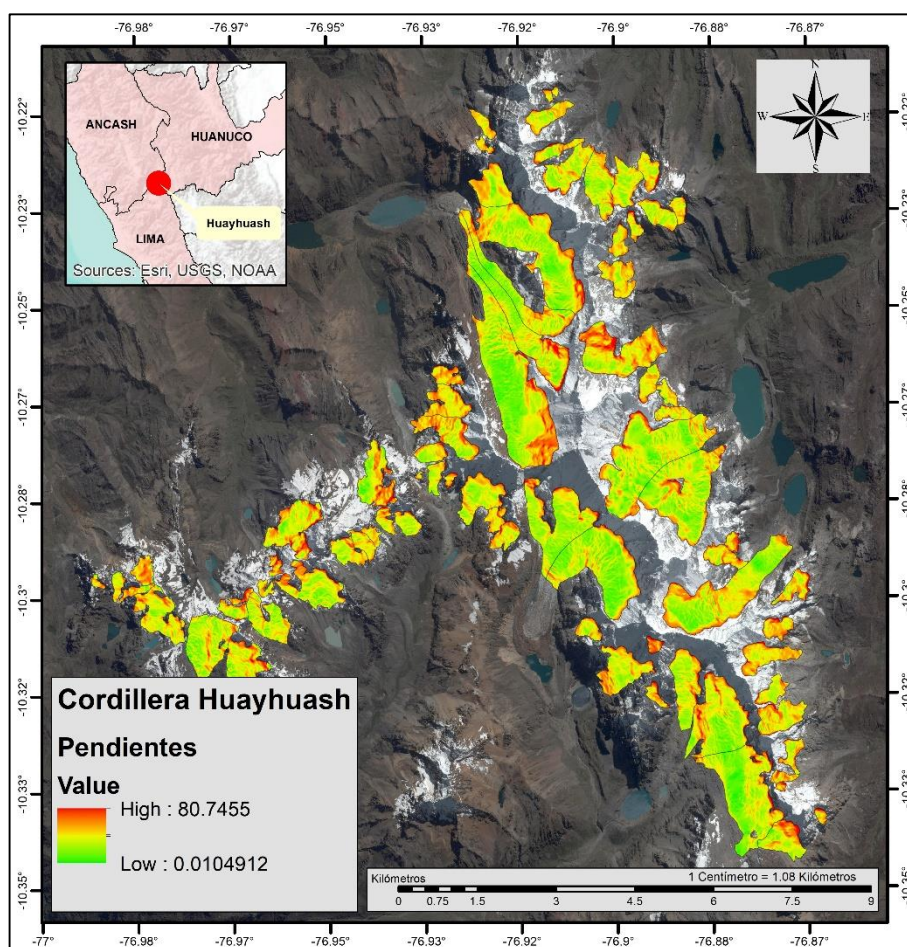


Figura 18. Mapa de Pendientes con los glaciares contorneados.

Continuando con el procedimiento para el cálculo del volumen glaciar, se generó un *Polígono* con las *Curvas de Nivel* y la *Cartografía Glaciar* del año 2017, seleccionando en el ArcGIS la función *Feature To Polygon*. El *Polígono* obtenido se intersecó con las *Branch Line*, a fin de tener *Líneas Segmentadas* de 50 m. de rango de elevación.

Las *Líneas Segmentadas* obtenidas en la acción 1, servirán como entrada a la acción 2 y 3. Cabe señalar que el propósito de ambas acciones (2 y 3) es generar puntos base dentro de cada glaciar, a fin de calcular en la acción 4 los valores de espesores centrales y continuos.

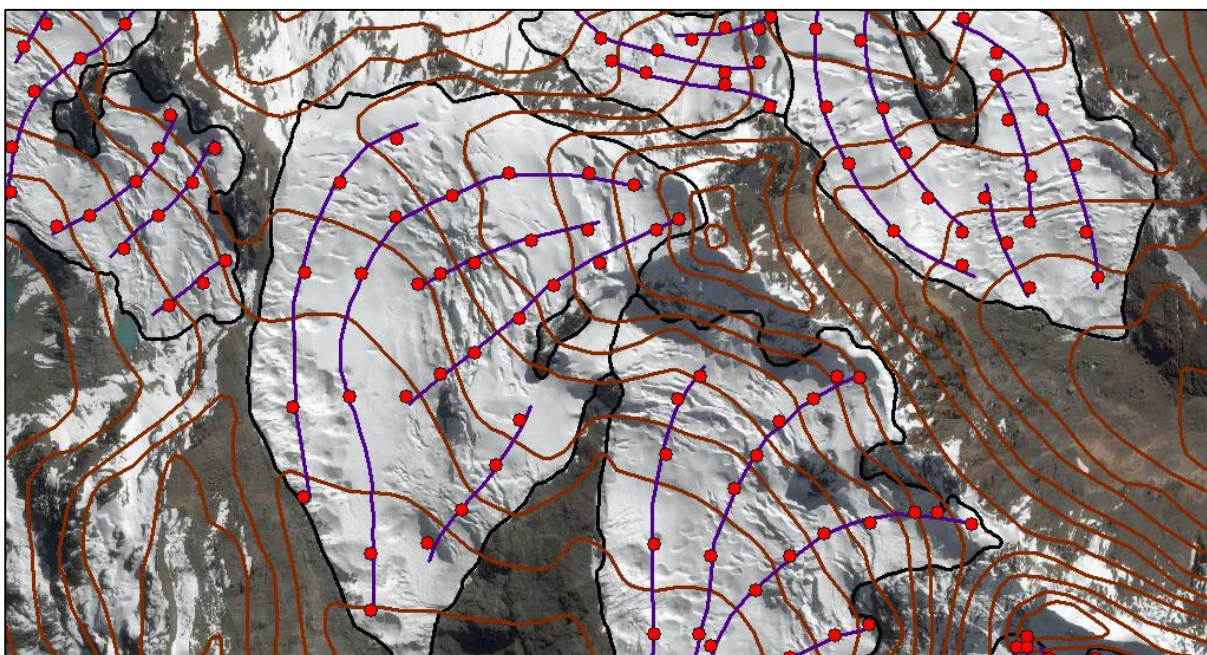


Figura 19. Puntos centrales de los segmentos de las *Branch Line* intersecados por las curvas de nivel de 50 m de intervalo dentro del glaciar.

Los *Puntos para Espesores Continuos* son celdas estimadas estadísticamente al contorno de las *Branch Line* (acción 2), para su obtención usamos de entrada las *Líneas Segmentadas* y los valores del *Mapa de Pendientes* obtenidas en la acción 1, generando de este modo puntos calculados estadísticamente a lo largo de las *Branch Line* en un *Ráster para Espesores Continuos* mediante la función *Zonal Statistic - Opción FID*.

Luego, convertimos el *Ráster para Espesores Continuos* a un formato de puntos utilizando la función *Raster to Point*, a fin de interpolar datos del ráster con la *Cartografía*

*Glaciar*, usando la función *Topo to Raster*, obteniendo de este modo un *Ráster de Puntos para Espesores Continuos con valores de la Pendiente Media* del glaciar.

En los *Puntos para Espesores Centrales* (acción 3), las Líneas Segmentadas fueron convertidas al formato ráster denominado *Ráster de Segmentación* mediante la función *Polyline to Raster*.

El *Ráster de Segmentación*, mediante la función *Zonal Geometric-Centroid*, fue convertido a un *Ráster para Espesores Centrales*, a fin de que la pendiente se promedie automáticamente a una distancia más larga en las partes planas del glaciar que en las partes empinadas.

El *Ráster para Espesores Centrales* se convirtió a un formato de puntos (*Puntos para Espesores Centrales*) utilizando la función *Raster to Point*. Cabe precisar que los puntos centrales aún carecen de valores de pendiente glaciar, lo cuales se asignaron mediante la función *Extract Multi Values to Point* al *Ráster de Puntos para Espesores Continuos*, obtenido en la acción 2, a fin de obtener *Puntos para Espesores Centrales con valores de la Pendiente Media*.

Como mencionamos en los párrafos precedentes, con la acción 4 se estimaron los valores de espesor glaciar, para lo cual se convirtió la *Cartografía Glaciar* a formato ráster, mediante la función *Polygon to Raster*, el cual interpoló con el *DEM* original de 6 m, seleccionando la función *Zonal Statistics-Range* obteniendo de este modo la altura máxima y mínima glaciar (*Rango*).

Para aplicar la ecuación 1 (*Shear Stress*), fue necesario cambiar la unidad de medida obtenida del *Rango* glaciar de metros a kilómetros, es decir, el rango de elevación fue dividido entre 1000.

Obtenida la variación de la elevación  $\Delta h$  (*Rango*) en kilómetros, seleccionamos la opción *Raster Calculator* para ingresar la ecuación 1:



$$\tau = 0.005 + 1.584 \left( \frac{Rango}{1000} \right) - (0.435) \left( \frac{Rango}{1000} \right)^2$$

Dónde:

$\tau$ : Es el esfuerzo cortante o *Shear Stress*,

*Rango*: Es la variación de elevación ( $\Delta h$ ) de cada glaciar.

Los valores del *Shear Stress* correspondientes a los puntos de espesores centrales fueron multiplicados por 100000 para cambiar la unidad de medida a Pascal (Pa).

Al depender el espesor del hielo ( $e$ ) del *Shear Stress* ( $\tau$ ) y la pendiente media ( $\alpha$ ), fue necesario tener ambos valores en un mismo punto, por lo que utilizamos la función *Extract Multi Values to Point* para extraer los valores de *Shear Stress*, obtenidos en la ecuación 1, e ingresarlos a los *Puntos para Espesores Centrales con Valores de Pendiente Media* obtenidos en la acción 3.

Obtenido del procedimiento anterior los *Puntos para Espesores Centrales con Valores de Shear Stress y Pendiente Media*, fue necesario convertir la unidad de medida de la pendiente glaciar al sistema de radianes.

Con la ecuación (2) obtuvimos los *Puntos Centrales con Espesores*, aplicando la función *Raster Calculator* a fin de ingresar los datos siguientes:

$$e = \frac{Shear\ Stress\ (\tau)}{\rho \cdot g \cdot f \cdot \sin\left(PendienteMedia \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

Donde:

$e$ : Espesores de los glaciares del año 2017

$\tau$ : Es el esfuerzo cortante o *Shear Stress*,

$\rho$ : Es la densidad del hielo (900 kg/m<sup>3</sup>),

$g$ : Es la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>), y

$f$ : Es el factor de forma (aquí se establece la constante de 0.8)

$\alpha$ : Es el ángulo de la pendiente media expresada en radianes.

Además de los valores de los *Puntos Centrales con Espesores*, se calculó valores de *Espesores Centrales Interpolados* adicionales entre los puntos para espesores centrales y continuos con la función *IDW (Interpolación mediante distancia inversa ponderada)* usando una configuración estándar (radio: 5 veces el tamaño de la celda, número mínimo de puntos: 2, potencia: 2,0).

Luego, se extrajo los valores del *Espesor Central Interpolados* obtenido, a fin de ingresarlos al *Raster de Puntos para Espesores Continuos* con valores de *Pendiente Media*, mediante la función *Extract Multi Values to Point* para obtener valores de los *Espesores Continuos Finales*.

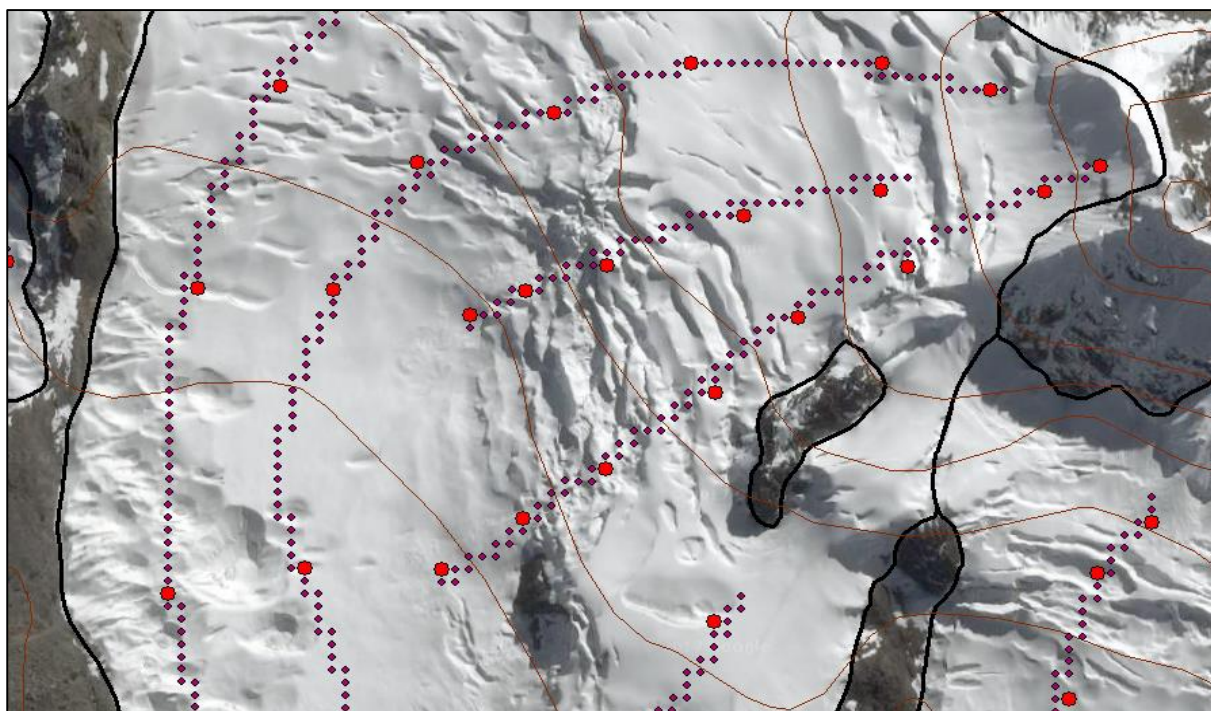


Figura 20. Puntos rojos son los espesores centrales y los puntos morados son los espesores continuos interpolados para el cálculo del volumen glaciar.

Con los *Espesores Centrales Interpolados* y *Espesores Continuos Finales* obtenidos en la acción 4, se creó un *Ráster de Espesores* correspondientes al año 2017 (acción 5), lo cual requirió también la *Cartografía Glaciar* y la aplicación de la función *Topo to Raster*.

Finalmente, para estimar el lecho basal se restó el *DEM* original con el *Raster de Espesores* correspondientes al año 2017, obtenido en la acción 5, mediante la función *Raster Calculator*.

### 3.5.5. Reconstrucción volumétrica glaciar del año 1962.

Para la reconstrucción volumétrica glaciar del año 1962 se utilizó la herramienta GLARE (*Glaciar Reconstruction*), resumida en el diagrama de la Figura 10 del punto 3.4.1.5.

La implementación de la herramienta GLARE, requiere de cuatro (04) acciones, para el *Cálculo del Shear Stress* (acción 1) es necesario dibujar líneas de flujo glaciar (*Flow Line*) en los glaciares de 1962, considerando la dirección natural del flujo glaciar, observado en las fotografías aéreas georreferenciadas y el análisis geomorfológico de las respectivas vertientes.

Dibujadas las *Flow Lines* se ordenaron de forma descendente, es decir desde el flujo mayor al flujo menor, teniendo como líneas de primer orden a los que partieron desde la lengua del glaciar hacia el circo más grande, siendo las de mayor aporte al glaciar. Luego en la parte inferior se dibujaron *Flow Lines* de segundo y tercer orden dependiendo de la geomorfología de cada glaciar.

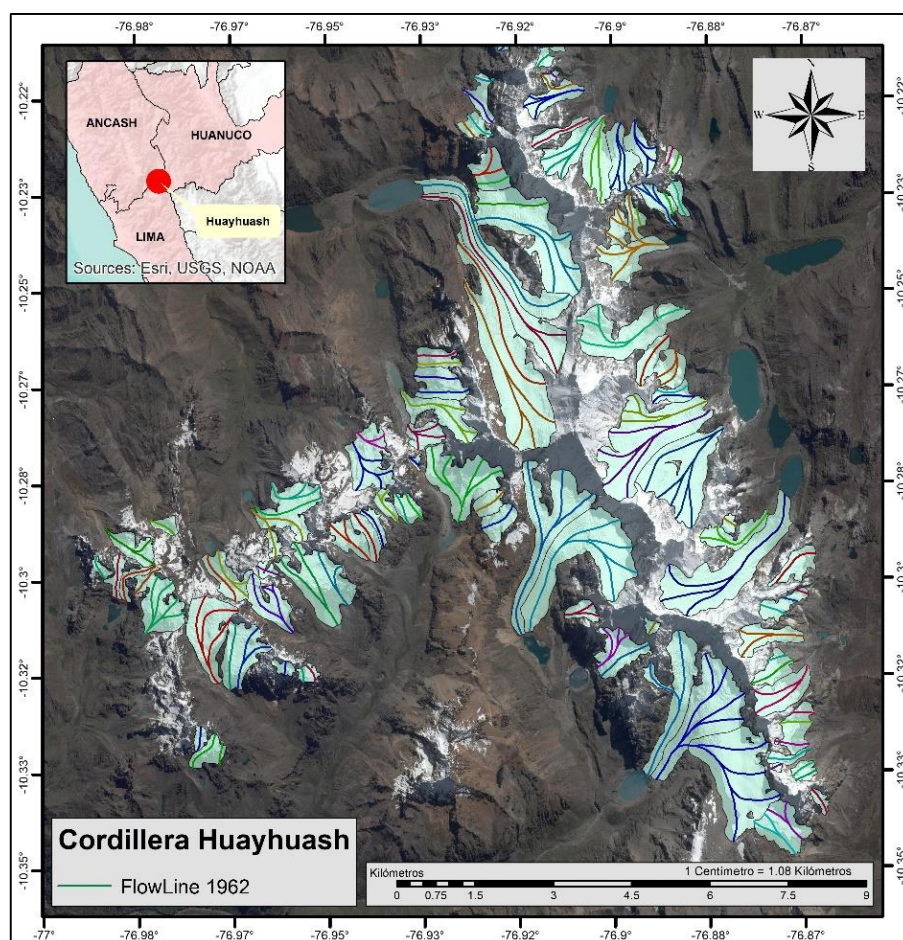


Figura 21. FlowLine en glaciares del año 1962.

Luego, mediante la función *Construct Interval Nodes* se convirtió cada *Flow Line* en nodos, asignándoles valores de *Shear Stress* con la función *Define Shear Stress*, precisamos que esta última función toma en cuenta el posicionamiento de cada nodo, es decir, si el nodo se encuentra sobre áreas con sedimentos es necesario ingresar una constante de 5000 kPa y si se encuentra sobre rocas de 10000 kPa, obteniendo de este modo nodos a lo largo de las líneas de flujo con valores de *Shear Stress*.

Debemos tener presente que la herramienta GLARE toma los mismos valores pre-programados de altura ( $h$ ), pendiente media ( $\alpha$ ), gravedad ( $g$ ) y densidad del hielo ( $\rho$ ) que la herramienta GLABTOP, a fin de reconstruir semiautomáticamente los espesores de cada glaciar. Por lo que en la acción 2, mediante la función *Flowline ice thickness tool*, se estimó automáticamente los valores de espesores específicos para cada nodo a partir del *DEM Basal* (obtenidos en el punto 3.5.4).

Cabe señalar, que para el *factor forma* ( $f$ ) se utilizó un valor predeterminado de 0.8 usado generalmente para glaciares actuales. Sin embargo, es necesario corregir el valor del *factor de forma* ( $f$ ), a fin de que este valor corresponda a la geomorfología glaciar del año 1962.

En este sentido, mediante la acción 3 se realizó la corrección del *factor de forma* ( $f$ ) con evidencia geomorfológica que dependa de la altura de la masa glaciar estimada, las morrenas laterales y la geometría de la topografía que han dejado los glaciares de 1962 en su retroceso mediante el análisis de un perfil topográfico, siguiendo la ecuación propuesta por Nye (1952b):

$$\text{Factor } (f) = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro} \cdot \text{Altura}}$$

Dónde:

*Área:* Es el Área transversal hasta la morrena más alta dentro del perfil topográfico.

*Perímetro:* Es la longitud de la sección transversal de contacto entre el hielo y el lecho glaciar.

*Altura:* Se calcula desde el lecho basal más bajo hasta la morrena más alta dentro del perfil topográfico.

Para calcular el valor del área se empleó la *fórmula de Gauss*, esta fórmula precisa de una figura geométrica cerrada con coordenadas de puntos dentro de un plano cartesiano, para obtenerla se creó un perfil topográfico glaciar dibujando en un nuevo *Shape*, una línea simple entre dos morrenas laterales previamente identificadas.

El *Shape* creado se interpoló con los datos del *DEM Basal* (obtenido en el punto 3.5.4) mediante la función *Interpolate Shape*, generando un *Shape Interpolado Basal*. Luego seleccionando *3D Analyst - Profile Graph*, se obtuvo un gráfico del perfil topográfico que muestra el cambio en la elevación de la superficie a lo largo de la línea del *Shape* dibujado. Este gráfico fue exportado a una *Hoja de Cálculo de Excel* en forma de coordenadas de puntos dentro del plano cartesiano con ejes X-Y respectivamente y con 92 puntos de control o coordenadas (Ver Tabla 2).

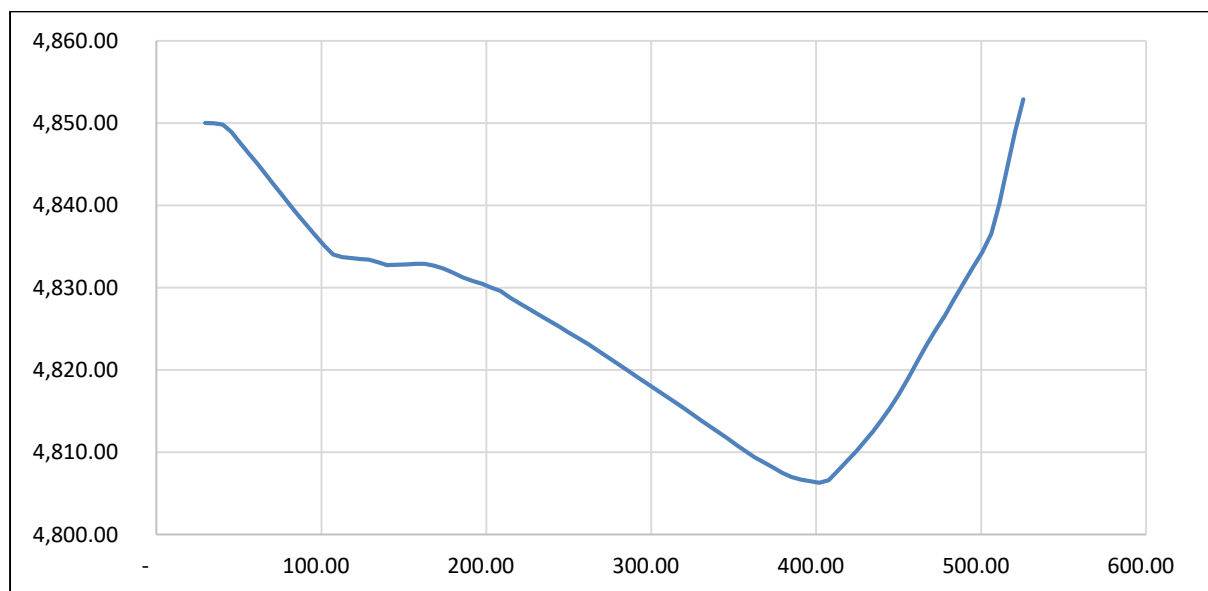


Figura 22. Perfil topográfico dentro de la cartografía de la cordillera Huayhuash del año 1962.

Tabla 2

*Puntos de control o coordenadas dentro del perfil topográfico de 1962 exportados desde el ArcGIS.*

Punto	Eje X	Eje Y	Punto	Eje X	Eje Y	Punto	Eje X	Eje Y
1	29.64	4,850.00	32	197.14	4,830.47	63	373.78	4,808.15
2	34.92	4,849.99	33	202.90	4,830.02	64	379.41	4,807.52
3	40.20	4,849.83	34	208.66	4,829.59	65	385.04	4,806.99
4	45.48	4,848.91	35	214.42	4,828.78	66	390.67	4,806.66
5	50.76	4,847.61	36	220.35	4,828.08	67	396.30	4,806.47
6	56.03	4,846.32	37	226.29	4,827.37	68	401.93	4,806.29
7	61.31	4,845.02	38	232.22	4,826.67	69	407.56	4,806.61
8	66.14	4,843.81	39	238.16	4,825.96	70	413.19	4,807.75
9	70.97	4,842.59	40	244.09	4,825.26	71	418.82	4,808.98
10	75.79	4,841.37	41	250.03	4,824.55	72	424.04	4,810.05
11	80.62	4,840.15	42	255.96	4,823.85	73	429.25	4,811.31
12	85.45	4,838.93	43	261.90	4,823.15	74	434.46	4,812.57
13	90.89	4,837.66	44	267.69	4,822.37	75	439.68	4,813.90
14	96.33	4,836.38	45	273.48	4,821.59	76	444.89	4,815.39
15	101.77	4,835.11	46	279.27	4,820.81	77	450.11	4,817.04
16	107.21	4,834.01	47	285.06	4,820.03	78	455.71	4,818.98
17	112.66	4,833.71	48	290.85	4,819.25	79	461.31	4,821.03
18	118.10	4,833.60	49	296.64	4,818.47	80	466.92	4,823.05
19	123.54	4,833.50	50	302.43	4,817.69	81	472.52	4,824.91
20	128.98	4,833.40	51	308.22	4,816.91	82	478.13	4,826.68
21	134.43	4,833.11	52	314.01	4,816.13	83	483.73	4,828.62
22	139.87	4,832.76	53	319.40	4,815.39	84	489.34	4,830.52
23	145.57	4,832.79	54	324.79	4,814.64	85	494.94	4,832.43
24	151.28	4,832.84	55	330.18	4,813.89	86	500.55	4,834.27
25	156.99	4,832.89	56	335.57	4,813.14	87	506.15	4,836.55
26	162.70	4,832.91	57	340.96	4,812.39	88	510.98	4,840.18
27	168.40	4,832.67	58	346.35	4,811.65	89	515.82	4,844.63
28	174.11	4,832.31	59	351.74	4,810.90	90	520.65	4,849.09
29	179.87	4,831.80	60	357.13	4,810.15	91	525.49	4,852.89
30	185.63	4,831.27	61	362.52	4,809.40	92	530.32	4,857.53
31	191.39	4,830.85	62	368.15	4,808.77			

A los puntos de control o coordenadas de la Tabla 3 se agregó 2 puntos de control adicionales para generar la figura geométrica cerrada necesaria para calcular mediante la *Fórmula de Gauss* el área glaciario, agregando el Punto 93 para mantener la altura de la morrena máxima en la dirección del punto de origen y el Punto 94 con los mismos valores de coordenadas del Punto 1 para poder cerrar la figura geométrica.

Tabla 3

*Puntos Adicionales para el perfil topográfico de 1962.*

Punto	Eje X	Eje Y
93	29.64	4,857.53
94	29.64	4,850.00

De esta manera se obtuvo la Figura 23:

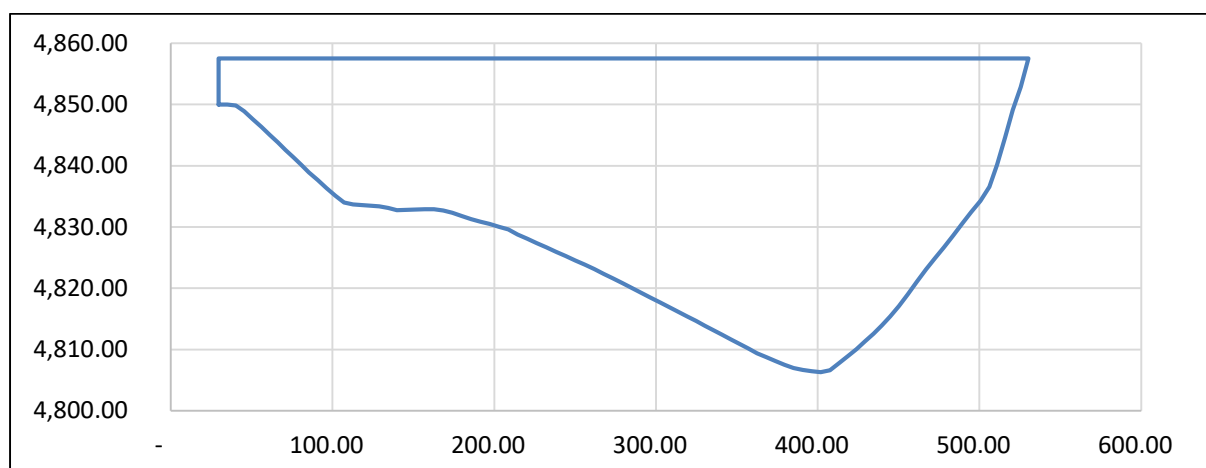


Figura 23. Figura geométrica cerrada del perfil topográfico de 1962.

Con un total de 94 puntos de control con sus coordenadas respectivas del perfil topográfico, se aplicó la *Fórmula del área de Gauss*:

$$\text{Área} = \frac{(\sum X_1 Y_2 \dots + X_n Y_1) - (\sum Y_1 X_2 \dots + Y_n X_1)}{2}$$

Dónde:

*Área:* Es el área de la sección transversal.

$X_n$ : Es el eje X en el punto “n” que representa la distancia horizontal.

$Y_n$ : Es el eje Y en el punto “n” que representa la altura en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

El área estimada resultante es de 15,696.47 m<sup>2</sup>.

Obtenida el área glaciaria, la ecuación propuesta por Nye (1952b): Factor  $(f)=\text{Área}/(\text{Perímetro} \cdot \text{Altura})$ , requiere además los valores del perímetro y la altura.

Para hallar la altura del perfil topográfico, se dedujo la diferencia entre el valor máximo y mínimo del eje Y, obteniendo un valor de 51.24 m.

Tabla 4

*Altura máxima y mínimo del perfil topográfico de 1962*

	Eje Y
Máximo	4,857.53
Mínimo	4,806.29
Altura	51.24

Para calcular el perímetro se exportó el archivo *Shape Interpolado Basal* a un formato KML para visualizarlo en el Google Earth Pro mediante la herramienta *Layer to KML*.

En Google Earth Pro, seleccionamos la función *Mostrar perfil de elevación*, visualizando el total del *Shape Interpolado Basal* dentro del glaciar de 1962 observándose un perímetro de 530 m (Ver Figura 24).

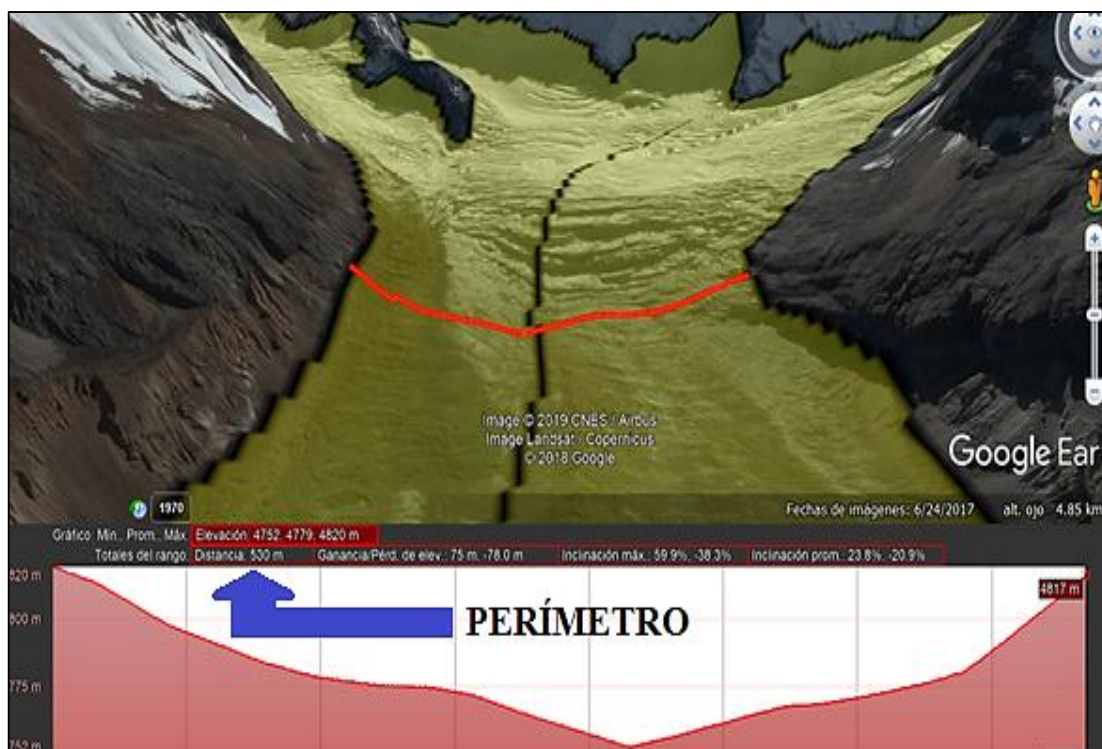


Figura 24. Perímetro de la sección transversal del perfil topográfico de 1962.



Obtenidos todos los valores, se procedió a calcular el valor del *factor de forma* ( $f$ ) de los glaciares de 1962:

$$\text{Factor de forma } (f) = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro} \cdot \text{Altura}} = \frac{15696.47}{530 \times 51.24} = 0.578$$

El valor obtenido del *factor de forma* ( $f$ ) se ingresó a la función *Ice thickness correction with user given (f) factor*, donde automáticamente cambia el valor del factor preestablecido para glaciares actuales por el valor obtenido mediante el análisis del perfil topográfico para obtener los espesores finales del año de 1962.

Con los valores de los espesores finales en todos los nodos dentro de la cartografía de los glaciares del año 1962, se generó un ráster de espesores (acción 4) usando la función *Topo to Raster*, obteniendo el Ráster de Espesores de 1962.

Así mismo es necesario obtener un DEM con la información de la altura total de los glaciares para posteriormente calcular sus respectivas ELA, es decir, al *DEM de Espesores de 1962* se le adicionó el *DEM Basal* del punto 3.5.4, mediante la función *Raster Calculator* obteniendo finalmente el *DEM de glaciares para el año de 1962*.

### **3.5.6. Reconstrucción volumétrica glaciar de la PEH.**

Para la reconstrucción volumétrica glaciar de la PEH, seguimos el mismo procedimiento detallado en el diagrama de flujo de la Figura 25, con entradas correspondientes a la paleocartografía.

El procedimiento, como se describe en el punto 3.5.5. Reconstrucción volumétrica glaciar del año 1962., requiere de líneas de flujo (*Flow Line*), en este caso estas líneas representaran el flujo que siguieron los glaciares de la PEH. Por lo que se dibujaron las *Flow Line* sobre los polígonos de los paleoglaciares cartografiados, considerando los criterios geomorfológicos.

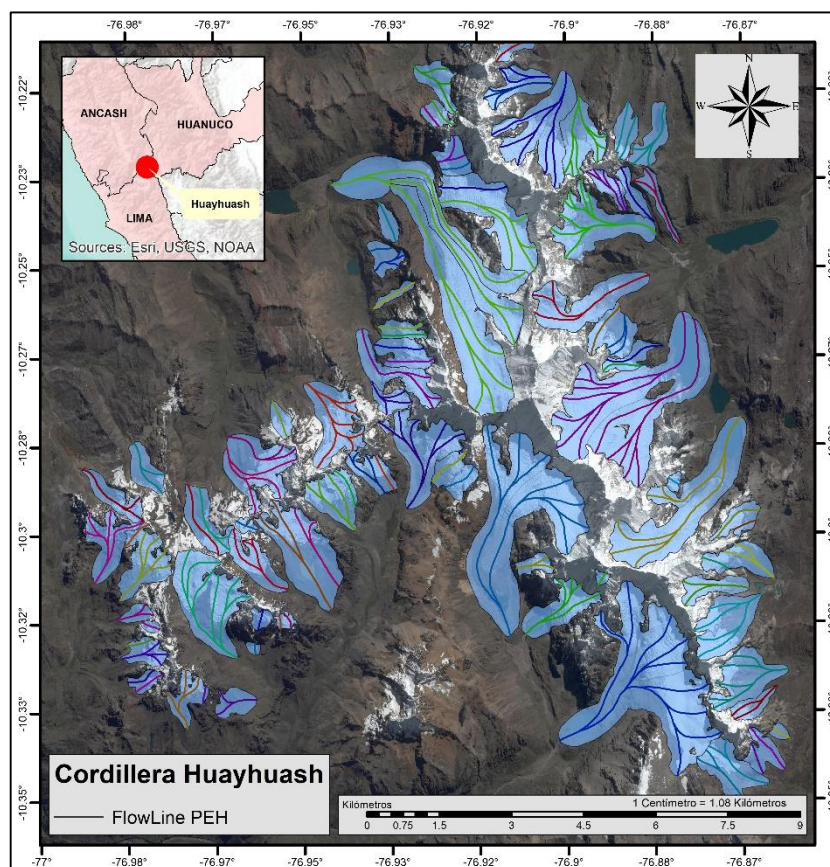


Figura 25. Flow line de la PEH en la cordillera Huayhuash.

Siguiendo la acción 1 del procedimiento de la herramienta GLARE, se convirtió cada *Flow Line* en nodos mediante la función *Construct Interval Nodes*, a fin de asignarles valores del *Shear Stress* con la función *Define Shear Stress*, considerando valores de 5000 kPa para glaciares que se encuentran sobre sedimentos y 10000 kPa si se encuentran sobre rocas.

Luego usando la función *Flowline ice thickness tool*, se estimaron espesores para cada nodo (acción 2), a partir del *DEM Basal* obtenido en el punto 3.5.4. Estos espesores son estimados automáticamente por la ecuación (2) y el *factor de forma (f)* incorporados en la herramienta GLARE.

Dado que se pretende calcular espesores para glaciares de la PEH, se debe considerar la diferencia geomorfológica. En ese sentido, se requirió corregir el *factor de forma (f)* (acción 3), mediante el análisis del perfil topográfico descrito en el punto 3.5.5, obteniendo un valor de 0.423.

Para realizar el análisis del perfil topográfico y aplicar la ecuación propuesta por Nye (1952b):  $f = \text{Área} / (\text{Perímetro} \cdot \text{Altura})$ , fue necesario hallar el área, el perímetro basal y la máxima variación altura correspondiente al perfil topográfico de la PEH.

Para calcular el valor del *Área* se empleó la *Fórmula de Gauss*, descrito también en el punto 3.5.5, requiriendo una figura geométrica cerrada con coordenadas de puntos dentro del plano cartesiano por lo que se dibujó un nuevo *Shape*, una línea simple entre dos morrenas laterales de un glaciar de la PEH.

El *Shape* creado se interpoló con los datos del *DEM Basal* (obtenido en el punto 3.5.4) mediante la función *Interpolate Shape*, generando un *Shape PEH Interpolado Basal* y aplicando dentro de la barra de herramientas *3D Analyst* del ArGIS la función *Profile Graph*, se obtuvo un gráfico del perfil topográfico que muestra el cambio en la elevación de la superficie a lo largo de la línea del *Shape* dibujado en el glaciar de la PEH. Luego, el gráfico fue exportado a una *Hoja de Cálculo de Excel* en forma de coordenadas de puntos dentro del plano cartesiano, con 95 puntos de control o coordenadas con ejes XY respectivamente.

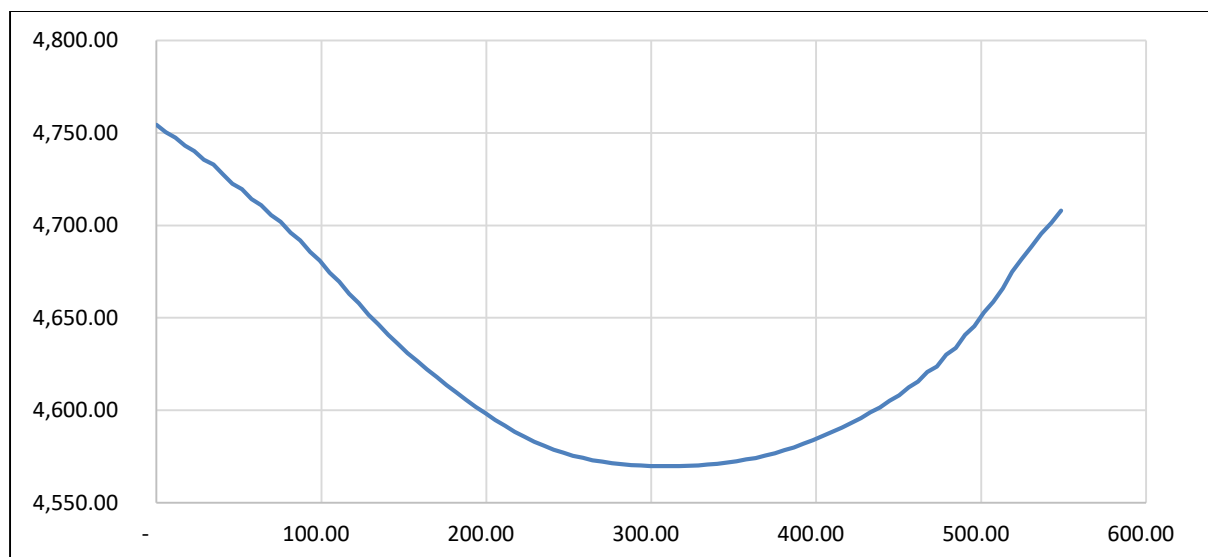


Figura 26. Perfil topográfico dentro de la cartografía de la cordillera Huayhuash de la PEH

Tabla 5

*Puntos de control o coordenadas del perfil topográfico de la PEH exportados desde el ArcGIS*

Punto	Eje X	Eje Y	Punto	Eje X	Eje Y	Punto	Eje X	Eje Y
1	-	4,754.33	33	187.70	4,605.71	65	374.90	4,576.79
2	5.75	4,750.35	34	193.60	4,601.84	66	380.70	4,578.48
3	11.51	4,747.36	35	199.50	4,598.35	67	386.50	4,579.99
4	17.26	4,743.03	36	205.40	4,594.74	68	392.30	4,581.99
5	23.01	4,740.22	37	211.30	4,591.69	69	398.10	4,583.90
6	28.77	4,735.48	38	217.20	4,588.43	70	403.90	4,586.10
7	34.52	4,732.87	39	223.10	4,585.87	71	409.70	4,588.35
8	40.27	4,727.76	40	229.00	4,583.04	72	415.50	4,590.67
9	46.03	4,722.48	41	234.90	4,580.99	73	421.30	4,593.29
10	51.78	4,719.54	42	240.80	4,578.69	74	427.10	4,595.78
11	57.69	4,714.27	43	246.70	4,577.16	75	432.90	4,598.86
12	63.61	4,710.93	44	252.60	4,575.40	76	438.69	4,601.53
13	69.52	4,705.47	45	258.50	4,574.31	77	444.49	4,605.18
14	75.44	4,701.85	46	264.40	4,573.03	78	450.29	4,608.05
15	81.35	4,696.05	47	270.30	4,572.29	79	456.00	4,612.47
16	87.26	4,691.93	48	276.20	4,571.38	80	461.71	4,615.48
17	93.18	4,685.62	49	282.10	4,570.88	81	467.42	4,620.82
18	99.09	4,681.02	50	287.90	4,570.38	82	473.13	4,623.76
19	105.01	4,674.46	51	293.70	4,570.17	83	478.83	4,630.01
20	110.92	4,669.55	52	299.50	4,569.95	84	484.54	4,633.70
21	116.84	4,662.99	53	305.30	4,569.89	85	490.25	4,640.74
22	122.75	4,657.93	54	311.10	4,569.89	86	495.96	4,645.50
23	128.66	4,651.63	55	316.90	4,569.92	87	501.67	4,652.86
24	134.58	4,646.62	56	322.70	4,570.12	88	507.37	4,658.62
25	140.49	4,640.81	57	328.50	4,570.27	89	513.08	4,665.90
26	146.39	4,636.06	58	334.30	4,570.75	90	518.79	4,674.93
27	152.29	4,630.97	59	340.10	4,571.08	91	524.50	4,681.77
28	158.19	4,626.65	60	345.90	4,571.84	92	530.47	4,688.35
29	164.09	4,622.09	61	351.70	4,572.39	93	536.44	4,695.52
30	169.99	4,617.92	62	357.50	4,573.46	94	542.40	4,701.17
31	175.89	4,613.67	63	363.30	4,574.27	95	548.37	4,707.95
32	181.80	4,609.61	64	369.10	4,575.65			

Se agregó 2 puntos de control adicionales para generar la figura geométrica cerrada a los puntos de control de la Tabla 5, el Punto 96 para mantener la altura de la morrena máxima en la dirección del punto de origen y el Punto 97 con los mismos valores de coordenadas del Punto 1 para poder cerrar la figura geométrica.

Tabla 6

*Puntos adicionales del perfil topográfico de la PEH*

Punto	Eje X	Eje Y
96	29.64	4,850.25
97	489.34	4,850.25

Obteniendo la siguiente figura:

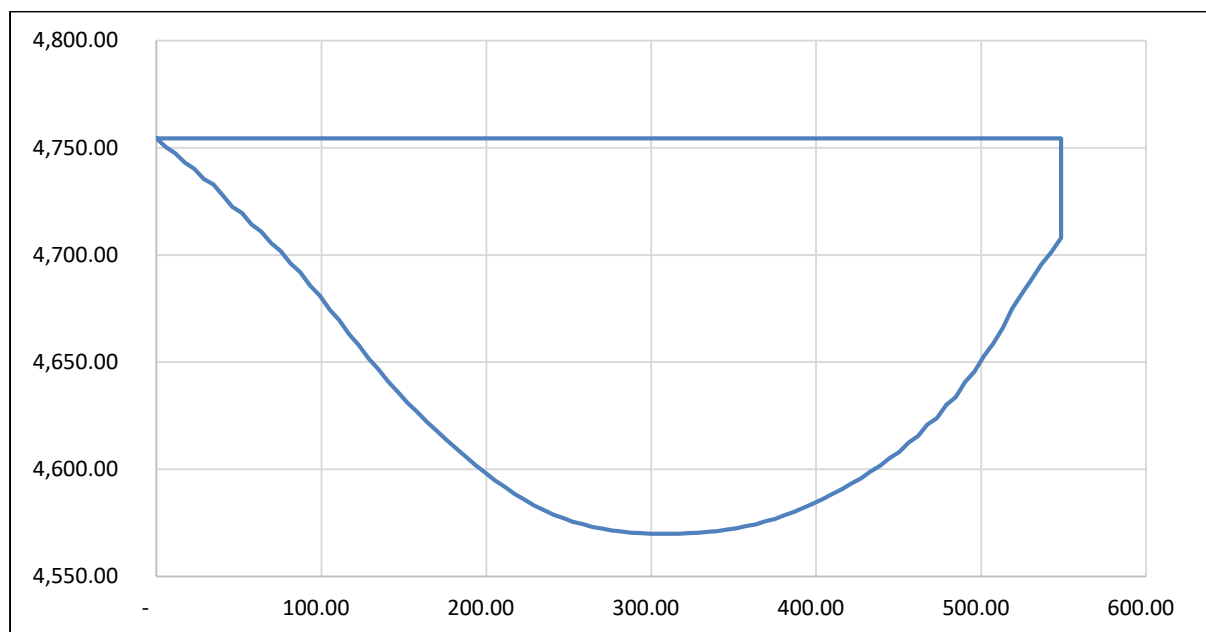


Figura 27. Figura geométrica cerrada del perfil topográfico de la PEH.

Con un total de 97 puntos de control con sus coordenadas respectivas del perfil topográfico, se aplicó la *Fórmula del área de Gauss*:

$$\text{Área} = \frac{(\sum X_1 Y_2 \dots + X_n Y_1) - (\sum Y_1 X_2 \dots + Y_n X_1)}{2}$$

Dónde:

*Área*: Es el área de la sección transversal.

$X_n$ : Es el eje X en el punto "n" que representa la distancia horizontal.

$Y_n$ : Es el eje Y en el punto "n" que representa la altura en m.s.n.m.

El área estimada resultante es de 68,862.49 m<sup>2</sup>.

Para hallar la altura del perfil topográfico, se calculó la diferencia entre el valor máximo y mínimo del eje Y. Dando como resultado una altura de 184.44 m.

Tabla 7

Altura máxima y mínima del perfil topográfico de la PEH.

	Eje Y
Máximo	4,754.33
Mínimo	4,569.89
Altura	184.44

Para calcular el perímetro basal se exportó el archivo *Shape Interpolado PEH Basal* a un formato KML para visualizarlo en el Google Earth Pro mediante la herramienta *Layer to KML*.

Abrimos el archivo *Shape Interpolado PEH Basal* con formato KML en Google Earth Pro, y seleccionamos dentro de la barra de edición la función *Mostrar perfil de elevación*, dentro de la ventana emergente se observa el total del perímetro con 554 m mostrada en la Figura 28.

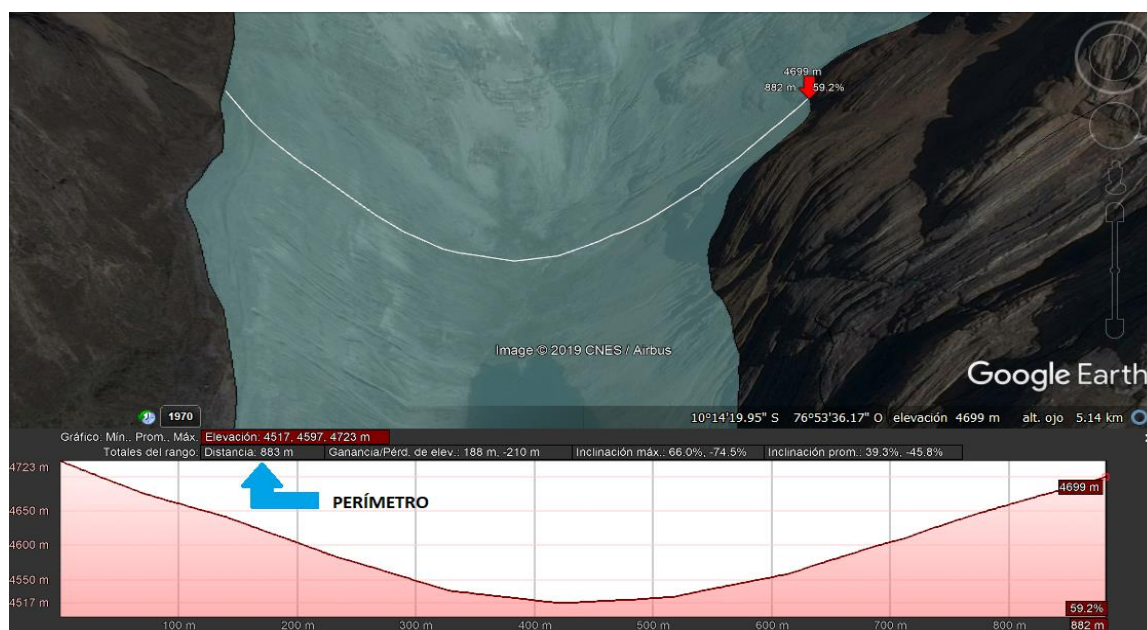


Figura 28. Perímetro de la sección transversal del perfil topográfico de la PEH.

Con los valores obtenidos se procedió a calcular el valor del *factor de forma* ( $f$ ) de los glaciares de 1962:

$$\text{Factor de forma } (f) = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro} \cdot \text{Altura}} = \frac{68,862.49}{883 \times 184.44} = 0.423$$

Siendo el valor obtenido 0.423, se consideró la propuesta de Nye (1965) que indica que si el *factor de forma* ( $f$ ) resultante del análisis del perfil topográfico de los paleoglaciares es

menor de 0.445, se deberá usar este último valor como nuevo factor de forma para el cálculo de los espesores finales, por lo que se asumió el valor de 0.445 para el *factor de forma (f)* corregido.

Asumiendo el *factor de forma (f)* de 0.445, se utilizó la función *Ice thickness correction with user given (f) factor*, para obtener los espesores de los paleoglaciares corregidos en cada nodo.

Finalmente, en la acción 4, utilizando la opción *Topo to Raster* se generó el *Ráster de Espesores* de los glaciares de la PEH, a fin de unirlos con el *DEM Basal* mediante la función *Raster Calculator*, generando un nuevo DEM de Huayhuash en la PEH para posteriormente calcular las ELA.

### 3.5.7. Cálculo de la ELA del año 2017, 1962 y PEH.

El cálculo de las ELA se realizó mediante la aplicación de la herramienta *ELA\_Calculation* en el entorno ARCGIS, desarrollada por Pellitero et al. (2015). Esta herramienta automatizada sigue el procedimiento de Osmaston (2005) para el AABR.

Dentro de la herramienta utilizamos la función *AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios* que necesita como datos de entrada un *DEM basal* más el volumen de los glaciares, es decir los Raster de Espesores calculados del año 2017, 1962 y de la PEH respectivamente. Además de una carpeta de salida donde se almacenará los cálculos respectivos.

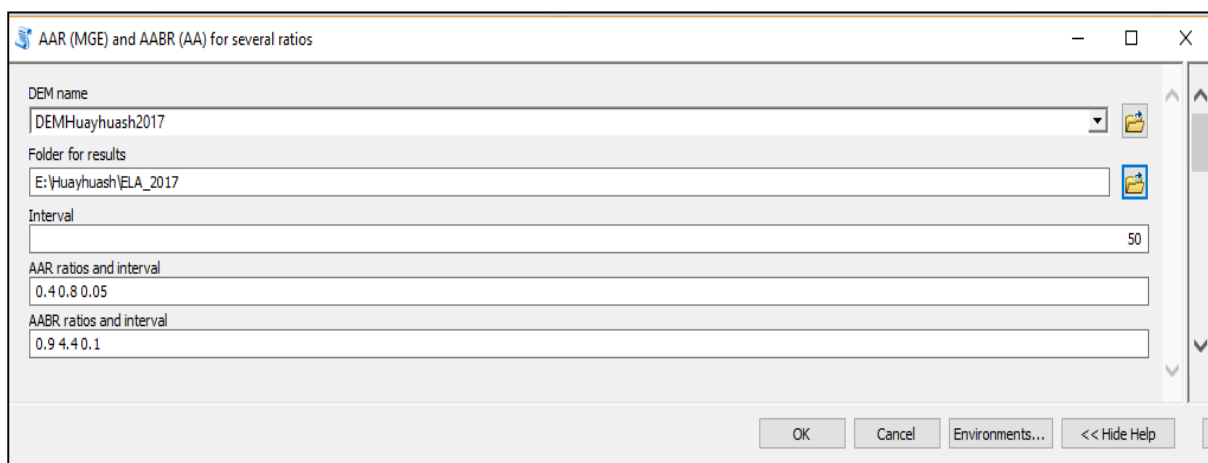


Figura 29. Función AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios con los datos de entrada y salida.

La Figura 29 muestra resultados de ELAs para diversos balances ratio, sin embargo, se debe elegir un único valor de ELA en función del valor de balance ratio.

Year / Period	Ratio	ELA Value
2017 (A)	MGE	5259.0
	AAR 0.4	5359.0
	AAR 0.45	5309.0
	AAR 0.5	5259.0
	AAR 0.55	5259.0
	AAR 0.6	5209.0
	AAR 0.65	5209.0
	AAR 0.7	5159.0
	AAR 0.75	5159.0
	AAR 0.8	5109.0
	AA	5246
	AABR 0.9	5259.0
	AABR 1.0	5259.0
	AABR 1.1	5259.0
	AABR 1.2	5209.0
	AABR 1.3	5209.0
	AABR 1.4	5209.0
	AABR 1.5	5209.0
	AABR 1.6	5209.0
	AABR 1.7	5209.0
	AABR 1.8	5209.0
	<b>AABR 1.9</b>	<b>5209.0</b>
	AABR 2.0	5159.0
	AABR 2.1	5159.0
	AABR 2.2	5159.0
	AABR 2.3	5159.0
	AABR 2.4	5159.0
	AABR 2.5	5159.0
	AABR 2.6	5159.0
	AABR 2.7	5159.0
	AABR 2.8	5159.0
	AABR 2.9	5159.0
	AABR 3.0	5159.0
AABR 3.1	5159.0	
AABR 3.2	5159.0	
AABR 3.3	5159.0	
1962 (B)	ELA MGE	5212.0
	ELA AAR 0.4	5312.0
	ELA AAR 0.45	5262.0
	ELA AAR 0.5	5212.0
	ELA AAR 0.55	5212.0
	ELA AAR 0.6	5162.0
	ELA AAR 0.65	5162.0
	ELA AAR 0.7	5112.0
	ELA AAR 0.75	5062.0
	ELA AAR 0.8	5062.0
	ELA AA	5193
	ELA AABR 0.9	5212.0
	ELA AABR 1.0	5212.0
	ELA AABR 1.1	5162.0
	ELA AABR 1.2	5162.0
	ELA AABR 1.3	5162.0
	ELA AABR 1.4	5162.0
	ELA AABR 1.5	5162.0
	ELA AABR 1.6	5162.0
	ELA AABR 1.7	5162.0
	ELA AABR 1.8	5112.0
	<b>ELA AABR 1.9</b>	<b>5112.0</b>
	ELA AABR 2.0	5112.0
	ELA AABR 2.1	5112.0
	ELA AABR 2.2	5112.0
	ELA AABR 2.3	5112.0
	ELA AABR 2.4	5112.0
	ELA AABR 2.5	5112.0
	ELA AABR 2.6	5112.0
	ELA AABR 2.7	5112.0
	ELA AABR 2.8	5112.0
	ELA AABR 2.9	5062.0
	ELA AABR 3.0	5062.0
ELA AABR 3.1	5062.0	
ELA AABR 3.2	5062.0	
ELA AABR 3.3	5062.0	
PEH (C)	ELA MGE	5154.0
	ELA AAR 0.4	5204.0
	ELA AAR 0.45	5204.0
	ELA AAR 0.5	5154.0
	ELA AAR 0.55	5104.0
	ELA AAR 0.6	5054.0
	ELA AAR 0.65	5054.0
	ELA AAR 0.7	5004.0
	ELA AAR 0.75	4954.0
	ELA AAR 0.8	4904.0
	ELA AA	5088
	ELA AABR 0.9	5104.0
	ELA AABR 1.0	5104.0
	ELA AABR 1.1	5054.0
	ELA AABR 1.2	5054.0
	ELA AABR 1.3	5054.0
	ELA AABR 1.4	5054.0
	ELA AABR 1.5	5054.0
	ELA AABR 1.6	5054.0
	ELA AABR 1.7	5004.0
	ELA AABR 1.8	5004.0
	<b>ELA AABR 1.9</b>	<b>5004.0</b>
	ELA AABR 2.0	5004.0
	ELA AABR 2.1	5004.0
	ELA AABR 2.2	5004.0
	ELA AABR 2.3	5004.0
	ELA AABR 2.4	5004.0
	ELA AABR 2.5	4954.0
	ELA AABR 2.6	4954.0
	ELA AABR 2.7	4954.0
	ELA AABR 2.8	4954.0
	ELA AABR 2.9	4954.0
	ELA AABR 3.0	4954.0
ELA AABR 3.1	4954.0	
ELA AABR 3.2	4954.0	
ELA AABR 3.3	4954.0	

Figura 30. Block de Notas de resultados de la función AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios para el año 2017 (A), 1962 (B) y la PEH (C).

En ese sentido, se asumió un balance ratio representativo de 1.92, obtenido del balance de masas en el monitoreo del glaciar Artesonraju para el año 2016 – 2017, realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), para hallar los valores de ELA para glaciares del 2017, glaciares de 1962 y glaciares de la PEH.

La función AAR(MEG) and AABR(AA) for several ratios (Ver Figura 29), proporciona un *Shape* representando cada ELA. A fin de representar la ELA estimada sobre el ráster, eliminamos dentro de la tabla de atributos las isolíneas que no corresponden a las alturas de las ELAs correspondientes al año 2017, al año 1962 y a la PEH, obteniendo una isolínea que representa la ELA glaciar para cada periodo (Ver Figura 31).



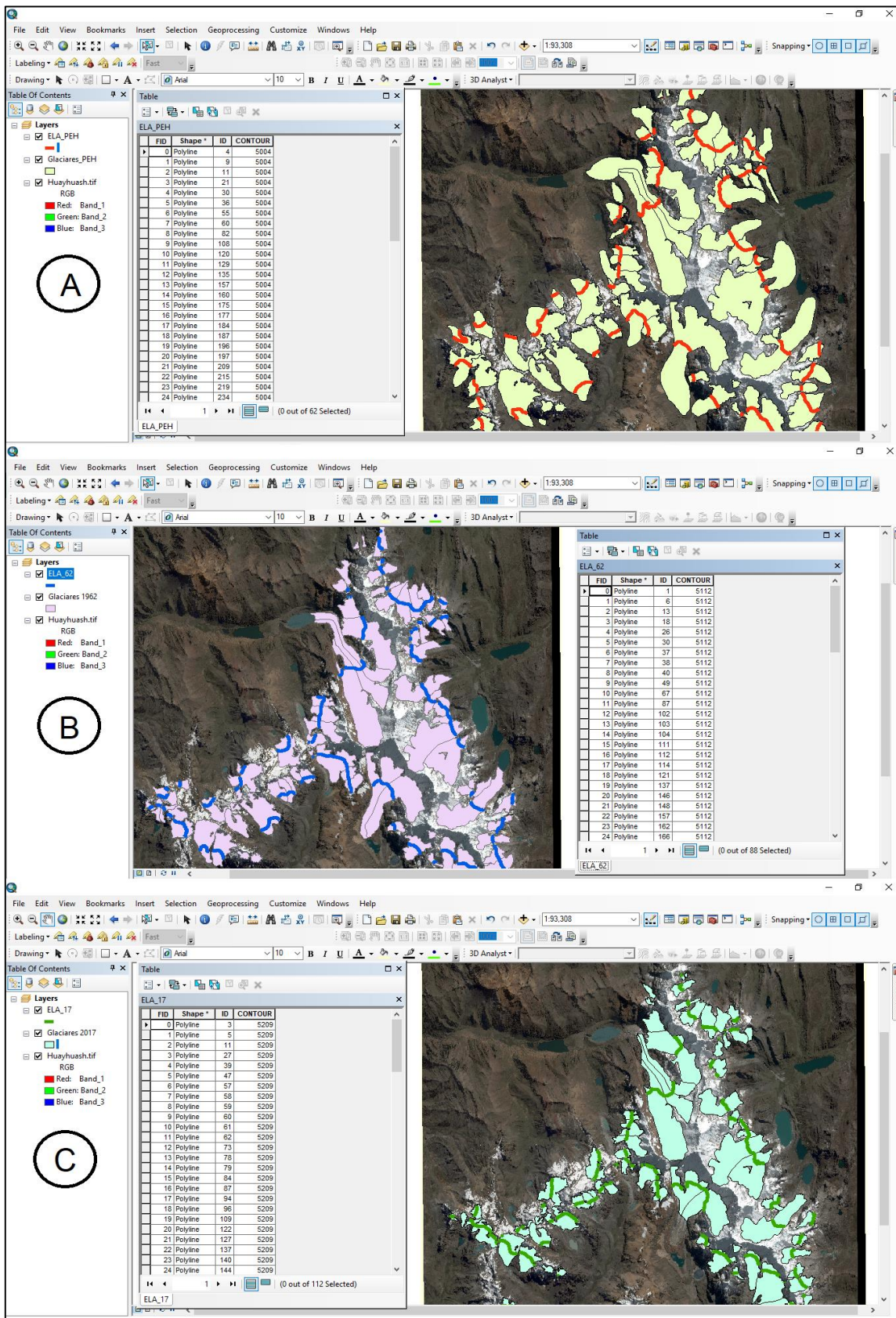


Figura 31. ELAs correspondientes a los glaciares de la PEH (A), del año 1962 (B) y 2017(C).

### 3.5.8. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100

Para El método de predicción para estimar el comportamiento predictivo de la ELA, se basa en modelos de regresión polinómica de 2<sup>do</sup> orden. El análisis de regresión es una herramienta matemática poderosa que permite determinar modelos sobre el comportamiento de las variables que intervienen en una situación en cualquier campo del conocimiento con el fin de hacer estimaciones dentro de un intervalo de confianza deseado.

Uno de los conceptos fundamentales sobre que se ha basado este análisis es que la ecuación de regresión cuadrática es obtenida a partir de los datos obtenidos de la PEH, 1962 y 2017, por ende, los resultados de la ELA<sub>2050</sub> y ELA<sub>2100</sub> son estimados de los parámetros del modelo matemático utilizado.

En este sentido, para realizar la estimación del comportamiento predictivo de la ELA e identificar la función que más se ajuste a los datos obtenidos, se estableció la tendencia a través de un diagrama de dispersión con los datos obtenidos de la ELA en la PEH, 1962 y 2017.

En el diagrama de dispersión estos puntos generan una parábola, considerando que la regresión es un método que se emplea para predecir el valor de una variable en función de valores dados a la otra variable, se hace posible determinar los parámetros de una parábola que mejor se ajusten a una serie de datos que poseemos.

Una función cuadrática o de segundo grado se puede representar de manera genérica como:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Donde:

- y: ELA (Variable dependiente)
- a, b, c: Parámetros de la ecuación.
- x: Año (Valor de la variable independiente)

Entonces calculando los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  se obtienen valores de “ $y$ ” cercanos al medido. Para el ajuste de un conjunto de datos al modelo de regresión cuadrática, se construye la siguiente tabla de distribución de datos:

Tabla 8

*Tabla de distribución para el cálculo de la regresión cuadrática.*

$x$	$y$	$x^2$	$x^3$	$x^4$	$x \cdot y$	$x^2 \cdot y$	$y^2$
$x_1$	$y_1$	$x_1^2$	$x_1^3$	$x_1^4$	$x_1 y_1$	$x_1^2 y_1$	$y_1^2$
$x_2$	$y_2$	$x_2^2$	$x_2^3$	$x_2^4$	$x_2 y_2$	$x_2^2 y_2$	$y_2^2$
$x_3$	$y_3$	$x_3^2$	$x_3^3$	$x_3^4$	$x_3 y_3$	$x_3^2 y_3$	$y_3^2$
$\Sigma x$	$\Sigma y$	$\Sigma x^2$	$\Sigma x^3$	$\Sigma x^4$	$\Sigma x \cdot y$	$\Sigma x^2 y$	$\Sigma y^2$

A partir de la Tabla 8 se calculan los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  para el ajuste del modelo de la siguiente manera:

$$b = \frac{\left[ \Sigma x - \frac{\Sigma x \cdot \Sigma y}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x^4 - \frac{(\Sigma x^2)^2}{n} \right] - \left[ \Sigma x^2 y - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma y}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x^3 - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma x}{n} \right]}{\left[ \Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x^4 - \frac{(\Sigma x^2)^2}{n} \right] - \left[ \Sigma x^3 - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma x}{n} \right]^2}$$

$$a = \frac{\left[ \Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x^2 y - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma y}{n} \right] - \left[ \Sigma x^3 - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma x}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x y - \frac{\Sigma x \cdot \Sigma y}{n} \right]}{\left[ \Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n} \right] \cdot \left[ \Sigma x^4 - \frac{(\Sigma x^2)^2}{n} \right] - \left[ \Sigma x^3 - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma x}{n} \right]^2}$$

$$c = \frac{\Sigma y - b \cdot \Sigma x - a \cdot \Sigma x^2}{n}$$

Donde:

$n$ : Tamaño de la muestra

Para determinar el grado de ajuste del modelo, se calcula el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de la siguiente manera:

$$r^2 = \frac{b \cdot \left[ \Sigma x y - \frac{\Sigma x \cdot \Sigma y}{n} \right] + c \cdot \left[ \Sigma x^2 y - \frac{\Sigma x^2 \cdot \Sigma y}{n} \right]}{\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}}$$

Es importante saber que este ( $r^2$ ) debe oscilar entre 0 y 1, cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros de la ecuación ( $a$ ,  $b$  y  $c$ ) y conociendo el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) procedemos a estimar el comportamiento predictivo de la ELA para el año 2050 y 2100.

$$ELA_{2050} = a(2050)^2 + b(2050) + c$$

$$ELA_{2100} = a(2100)^2 + b(2100) + c$$

### 3.5.9. Estimación de la variación de la temperatura.

La estimación de la variación de la temperatura requiere del ensayo de un método que consiste en relacionar el desnivel entre ELAs de los glaciares o paleoglaciares con el gradiente térmico vertical de la temperatura del aire, es decir el valor de la variación de la temperatura con el gradiente térmico vertical de la temperatura del aire (valor global medio de la Tierra GTV=6,5°C/km). La ecuación fue propuesta por Úbeda (2011).

$$\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$$

Dónde:

$\Delta T$ : Variación de la temperatura,

$\Delta ELA$ : Variación de la altitud de línea de equilibrio glaciar y,

GTV: Valor global medio de la Tierra.

La estimación de la ecuación se realizó en una *Hoja de Cálculo Excel* (Ver Figura 32). Estimando la variación de la temperatura desde el año 1962 al 2017, desde la PEH al año 1962 y desde la PEH al año 2017.

<b>ΔT (m) del año 1962 al año 2017</b>						
Sub Cuenca	Glaciares en 1962	Glaciares en 2017	ΔELA (m)	GTV (°C/m)	ΔT (m)	
Achin	5163	5208	45	0.0065	0.293	
Rapay	5065	5143	78	0.0065	0.507	
Alto Marañon	5169	5246	77	0.0065	0.501	
<b>Cordillera</b>	<b>5112</b>	<b>5209</b>	<b>97</b>	<b>0.0065</b>	<b>0.631</b>	
<b>ΔT (m) de la PEH al año 1962</b>						
Sub Cuenca	Glaciares en la PEH	Glaciares en 1962	ΔELA (m)	GTV (°C/m)	ΔT (m)	
Achin	5004	5163	159	0.0065	1.0335	
Rapay	5002	5065	63	0.0065	0.4095	
Alto Marañon	5000	5169	169	0.0065	1.0985	
<b>Cordillera</b>	<b>5004</b>	<b>5112</b>	<b>108</b>	<b>0.0065</b>	<b>0.702</b>	
<b>ΔT (m) de la PEH a 2017</b>						
Sub Cuenca	Glaciares en la PEH	Glaciares en 2017	ΔELA (m)	GTV (°C/m)	ΔT (m)	
Achin	5004	5208	204	0.0065	1.3260	
Rapay	5002	5143	141	0.0065	0.9165	
Alto Marañon	5000	5246	246	0.0065	1.5990	
<b>Cordillera</b>	<b>5004</b>	<b>5209</b>	<b>205</b>	<b>0.0065</b>	<b>1.3325</b>	

Figura 32. Hoja de Cálculo Excel aplicando la ecuación propuesta por Úbeda (2011).

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Con el objetivo de analizar el impacto de la variación de temperatura en la desglaciación de la cordillera Huayhuash, se cartografió, estimó áreas, volúmenes, ELAs y la variación de temperaturas de los glaciares del año 2017, 1962 y PEH (~1890).

### 4.1. Cartografía y estimación del área glaciara para la PEH, el año de 1962 y 2017

A fin de tener una mejor distribución de la información para el análisis e interpretación de resultados, dividimos el área de estudio en tres sectores: Sub Cuenca Achin, Sub Cuenca Rapay y la Inter-Cuenca Alto Marañón V (Unidad Hidrográfica 498999).

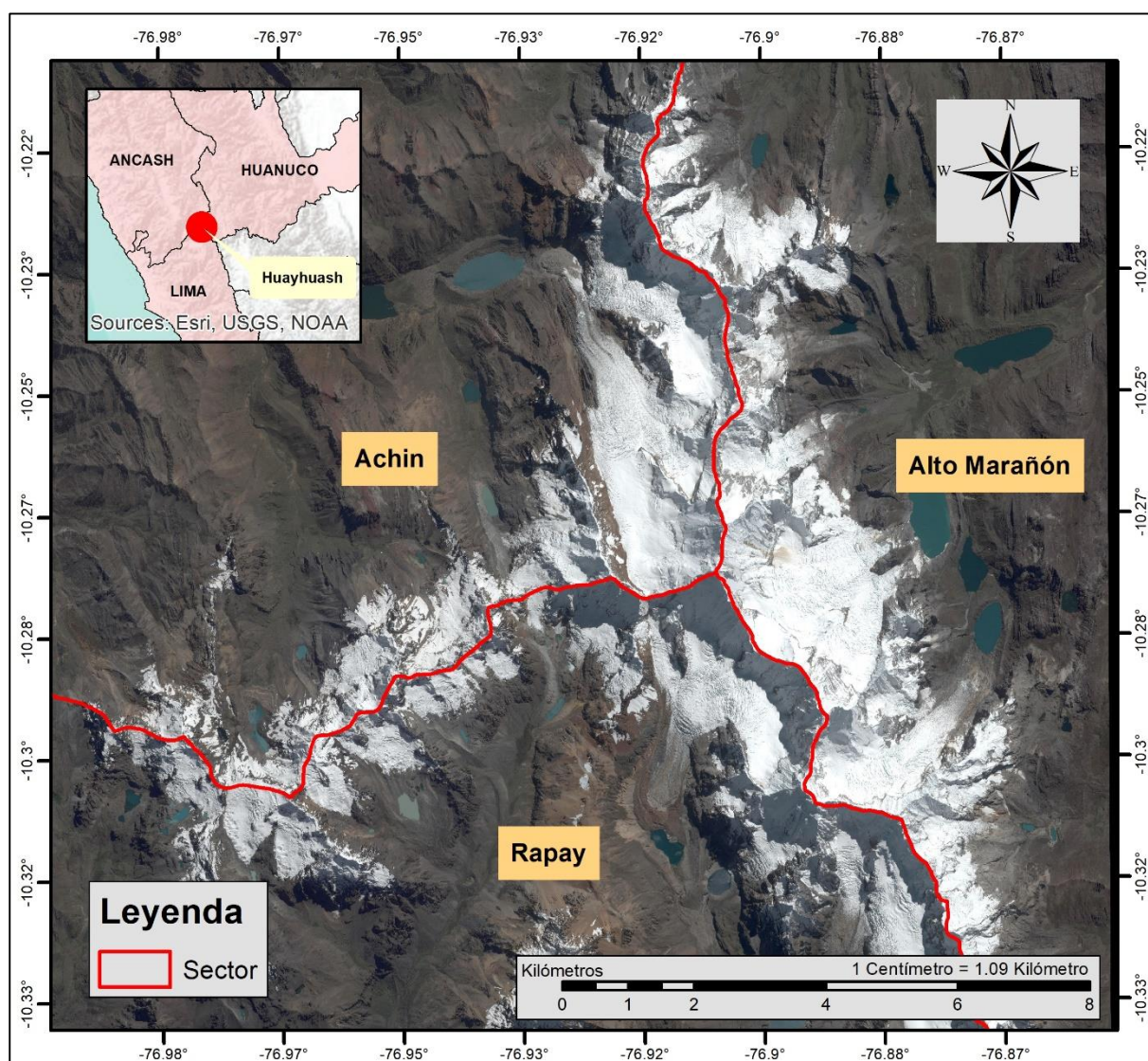


Figura 33. Cordillera Huayhuash distribuida por sectores.

De la cartografía para el año 2017 se identificaron 82 glaciares, 84 para el año 1962 y para la PEH 72 (Ver Figura 34), lo que da cuenta de la dinámica glaciár en cada periodo.

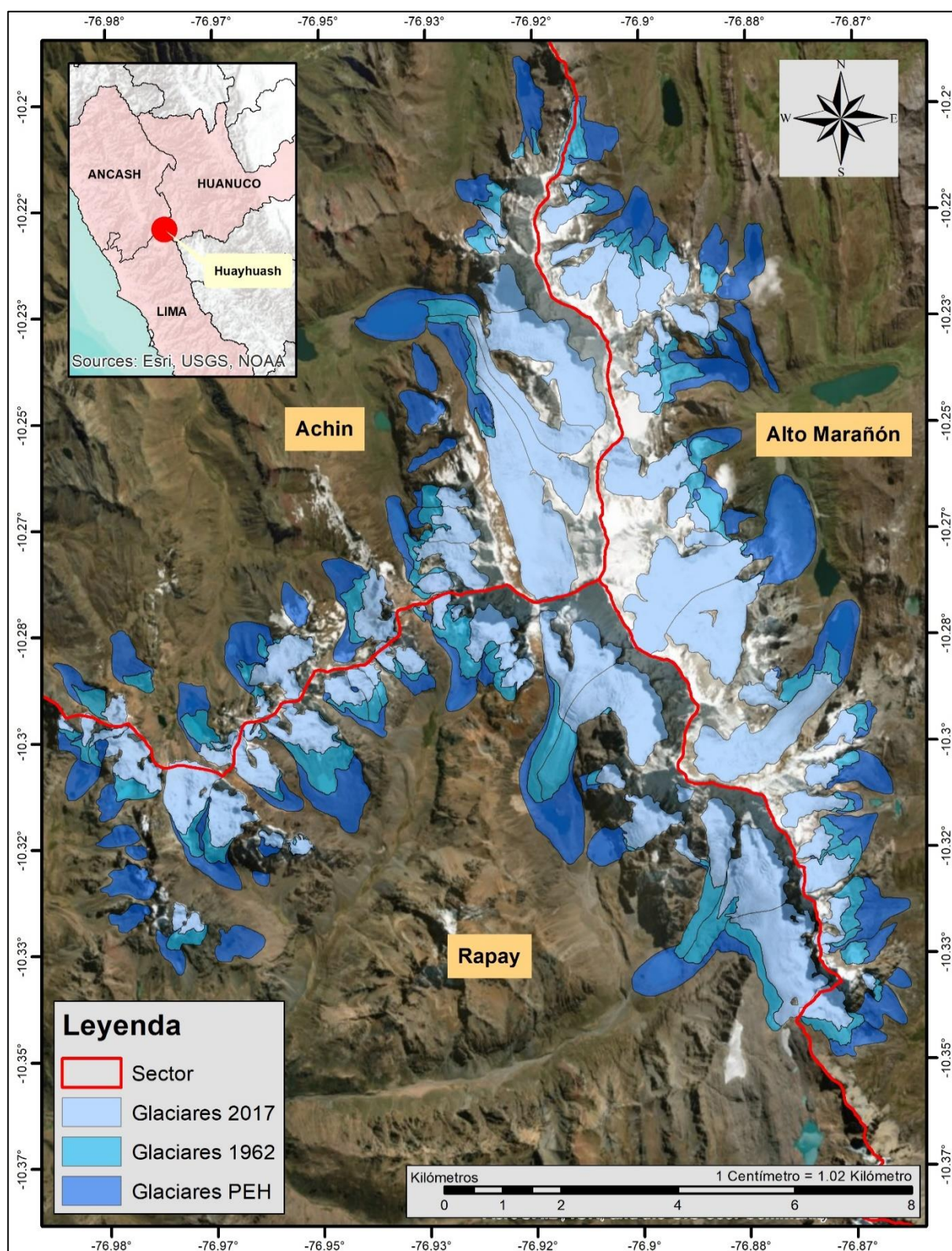


Figura 34. Glaciares en la PEH, 1962 y 2017 por sector.

Además, del total de glaciares identificados en la Cordillera Huayhuash, se determinó la cantidad de glaciares pertenecientes a cada sector por periodo, siendo Rapay el sector que agrupa el mayor número de glaciares en el año 2017 (33 glaciares), para el año 1962 el sector Alto Marañón (34 glaciares), y en la PEH los sectores Alto Marañón y Rapay (con 25 glaciares).

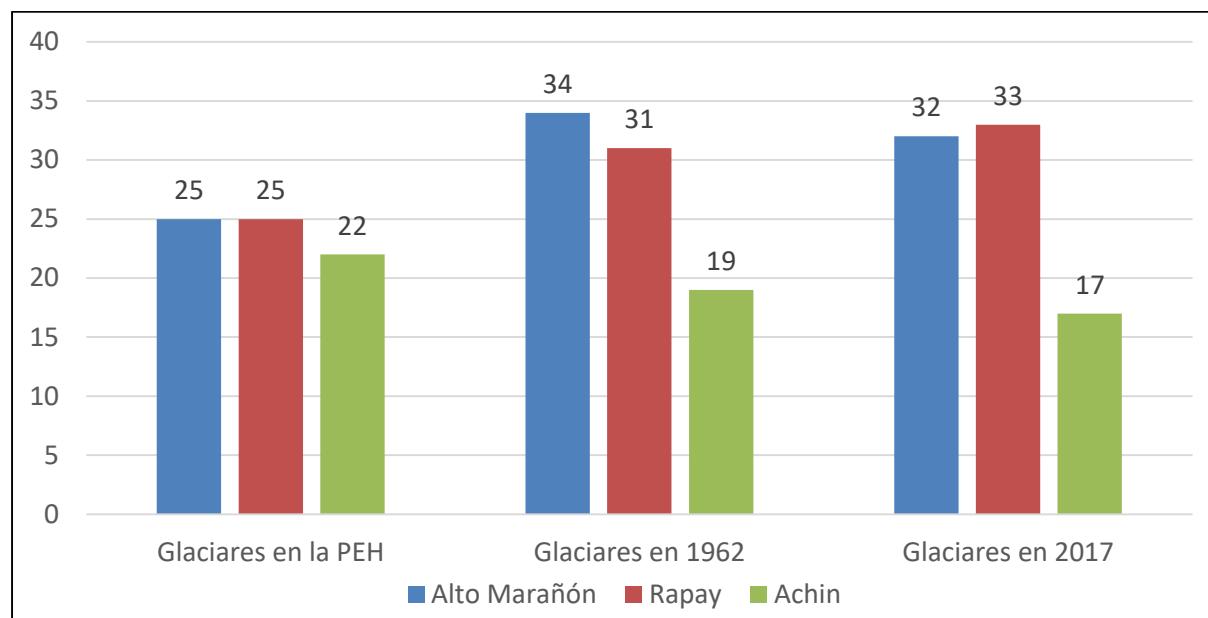


Figura 35. Gráfico que muestra el número de paleoglaciares y glaciares para cada sector en los diferentes periodos.

De la comparación de la cartografía por periodo en cada sector de la Cordillera Huayhuash se observa un proceso de fragmentación y extinción de los glaciares. Además, producto del proceso de fragmentación se observa un mayor número de glaciares, sin embargo, estos glaciares generados denotarían menor área y volumen glaciar.

Tabla 9

*Glaciares extintos, fragmentados y generados por periodo.*

Sector	Glaciares			De la PEH al año 1962			Del año 1962 al 2017			De la PEH al año 2017		
	PEH	1962	2017	Ext.	Frag	Gen	Ext.	Frag	Gen	Ext.	Frag.	Gen.
Alto Marañón	25	34	32	3	9	21	3	1	2	6	10	23
Rapay	25	31	33	6	8	20	0	1	3	6	9	23
Achin	22	19	17	4	1	2	3	1	2	7	2	4
TOTAL	72	84	82	13	18	43	6	3	7	19	21	50

Nota: "Ext.": Glaciares extintos, "Frag.": Glaciares fragmentados y "Gen.": Glaciares generados.



De la Tabla 9, se observa trece (13) glaciares extintos desde la PEH al año 1962 y seis (6) glaciares desde 1962 al 2017, es decir, desde la PEH al 2017 se extinguieron un total de diecinueve (19) glaciares.

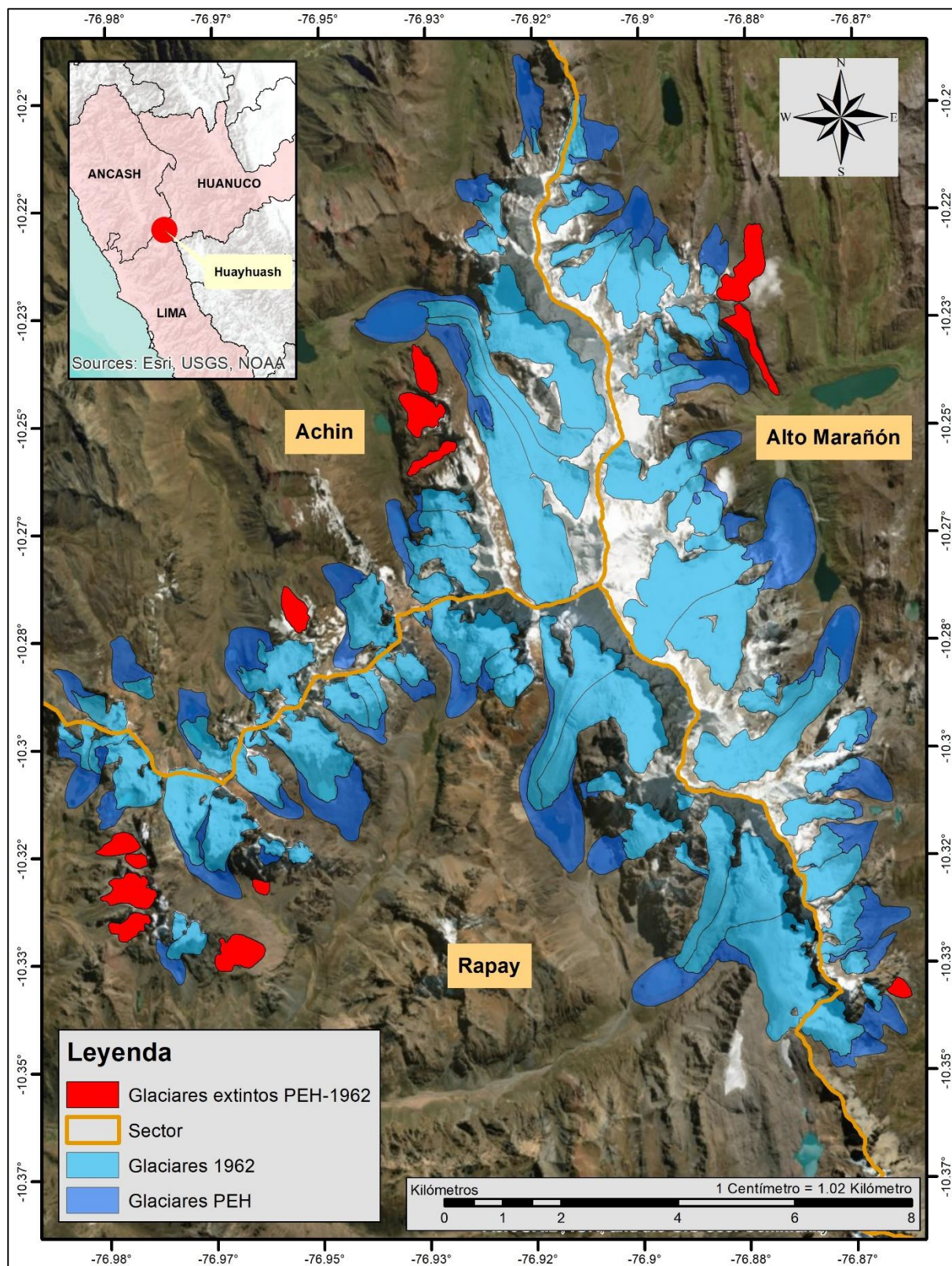


Figura 36. Proceso de extinción glaciar de la cordillera Huayhuash desde la PEH a 1962.

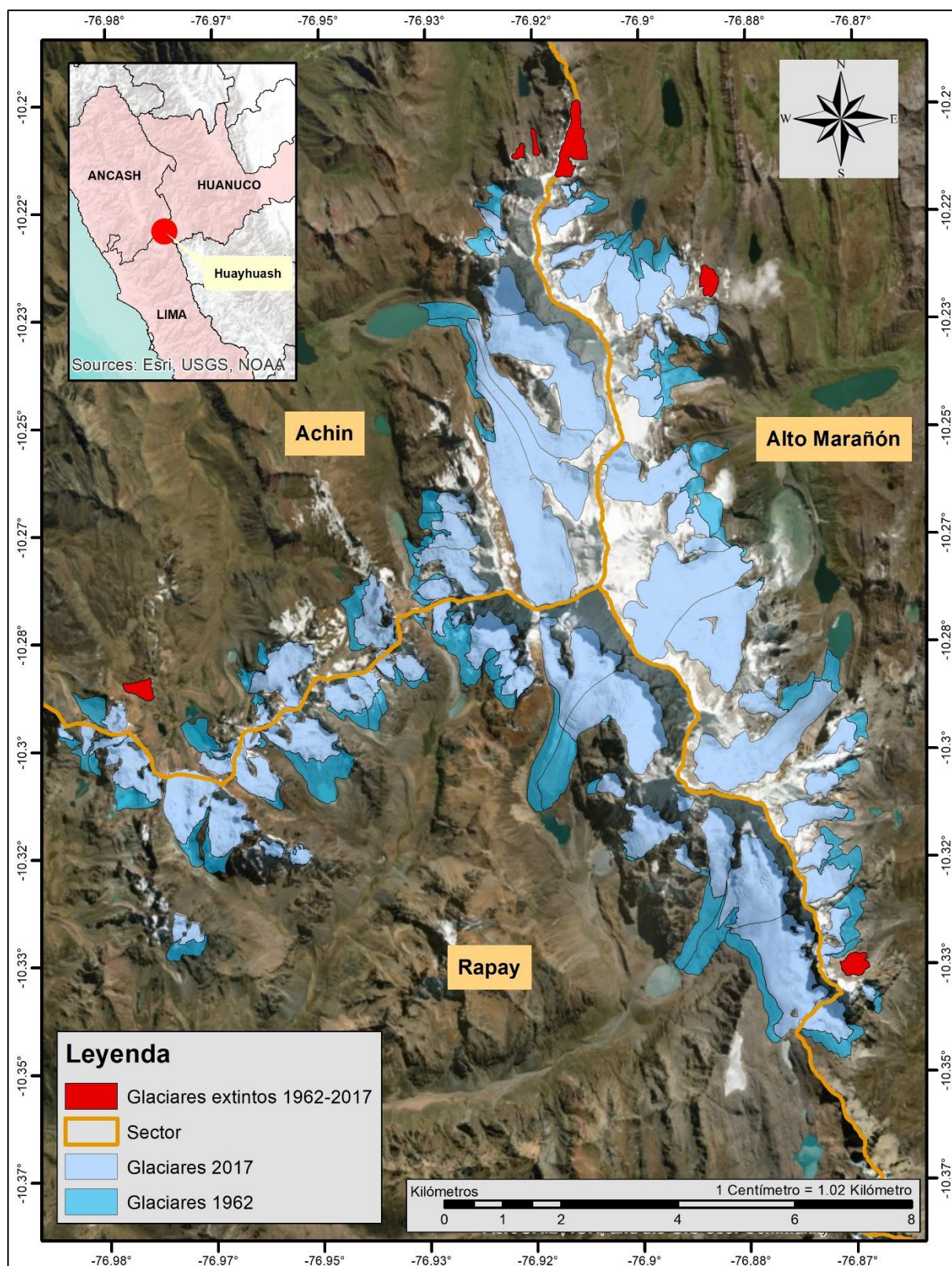


Figura 37. Proceso de extinción glaciaria de la cordillera Huayhuash, desde 1962 al 2017.

Respecto al proceso de fragmentación de los glaciares de la Cordillera Huayhuash, se observa que, 18 masas glaciarias compactas se fragmentaron en 43 glaciares independientes

durante el periodo comprendido desde la PEH hasta el año 1962. Desde 1962 al 2017, 3 masas glaciares compactas de la cordillera se fragmentaron en 7 glaciares individuales.

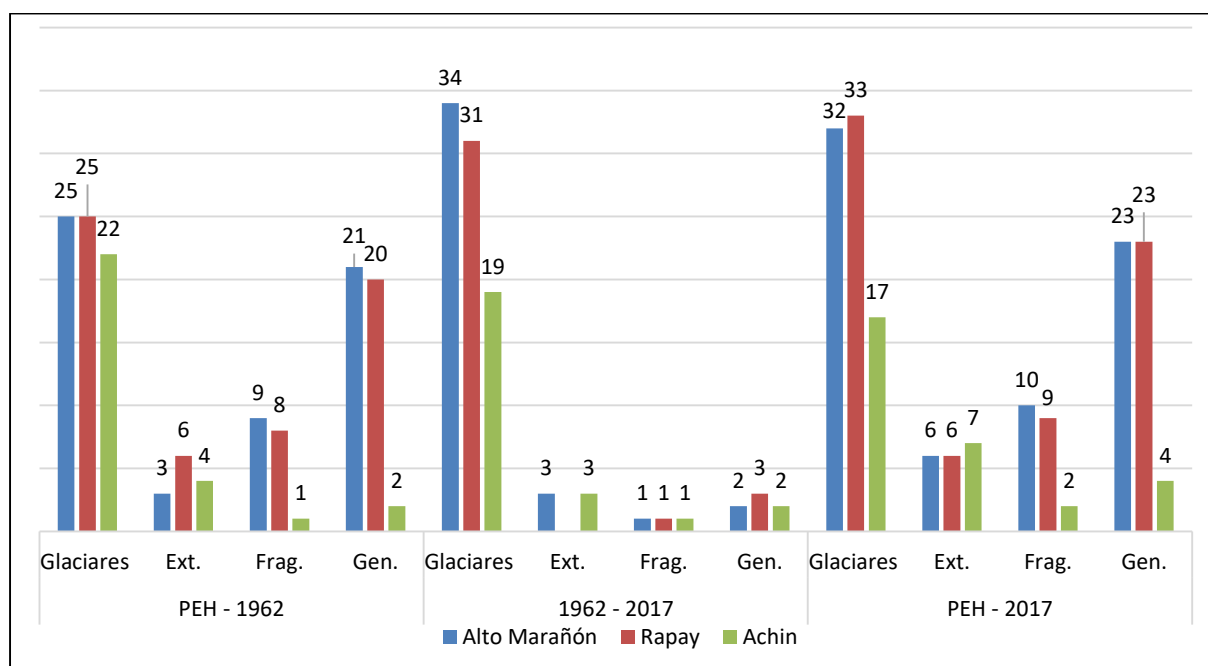


Figura 38. Gráfico que muestra el proceso de extinción, fragmentación y generación de glaciares en la cordillera Huayhuash.

En el sector Alto Marañón, nueve (9) masas glaciares compactas se dividieron en veintiún (21) glaciares individuales en el periodo comprendido desde la PEH al año 1962, y desde 1962 al 2017, una (1) masa glacial compacta de Rapay se dividió en 2 glaciares individuales.

En el sector Rapay, ocho (8) masas glaciares compactas se dividieron en veinte (20) glaciares individuales en el periodo comprendido desde la PEH al año 1962, y desde 1962 al 2017, una (1) masa glacial compacta de Rapay se dividió en 3 glaciares individuales.

Finalmente, en el sector Achin una (1) masa glacial compacta se dividió en dos (2) glaciares individuales en cada uno de los periodos (PEH al año 1962 y de 1962 al 2017), convirtiéndose en el sector menos afectado por el proceso de fragmentación en la cordillera Huayhuash.

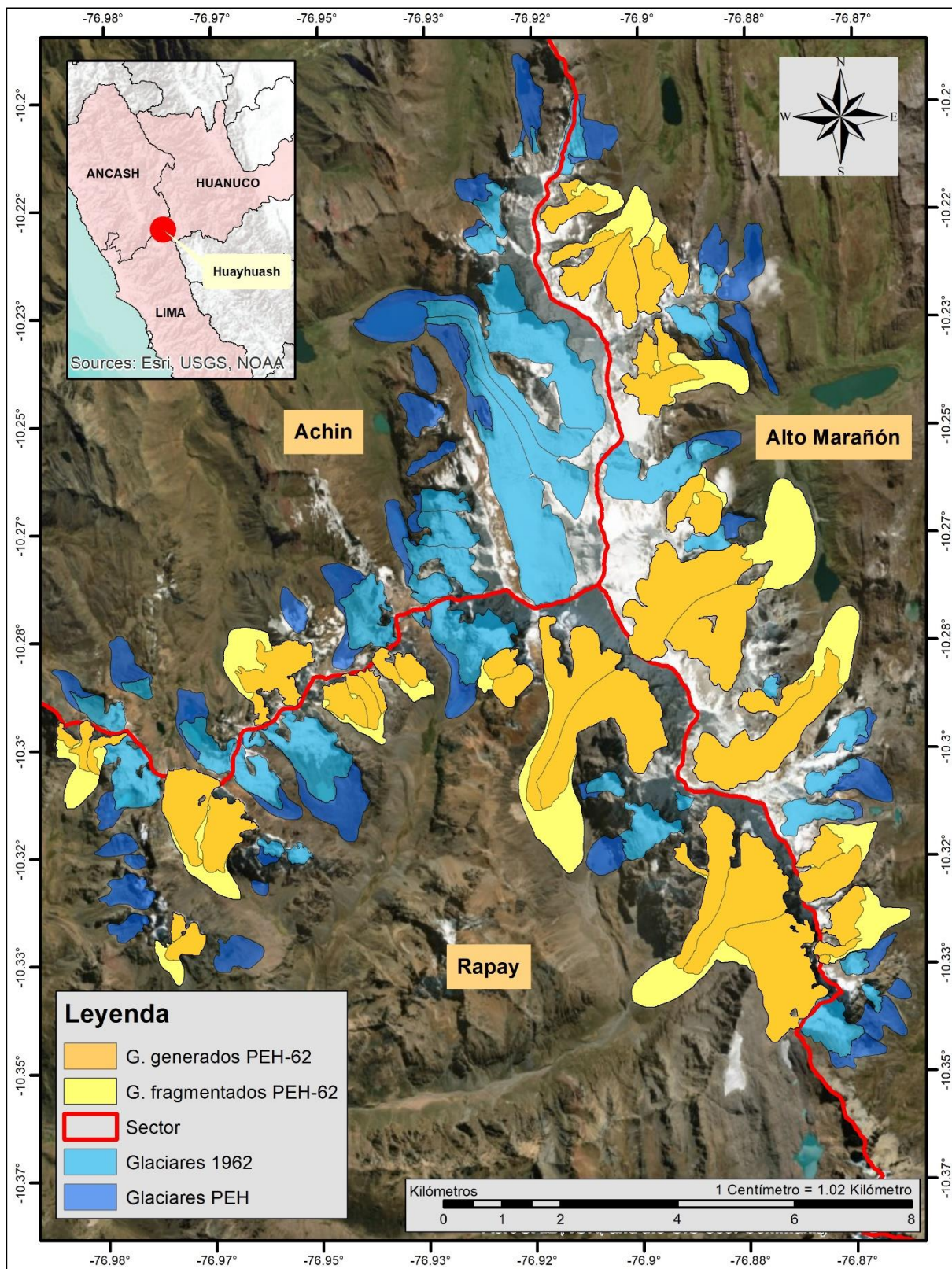


Figura 39. Proceso de fragmentación glaciar desde la PEH a 1962.

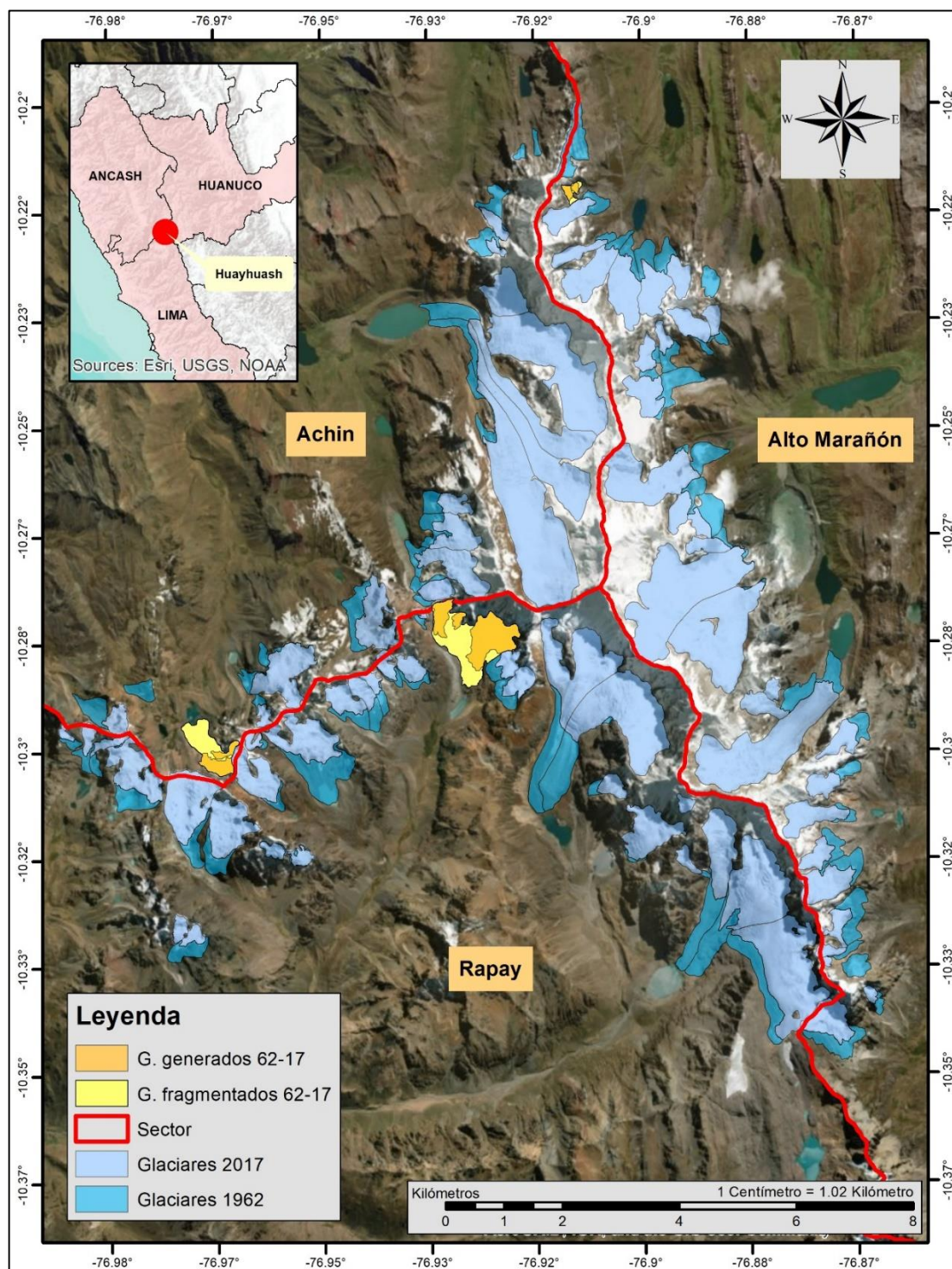


Figura 40. Proceso de fragmentación glaciar desde 1962 al 2017.

Cartografiar los glaciares para estimar el área, requirió del empleo de una nomenclatura que lleva el nombre del sector al cual pertenece el glaciar, el periodo, la letra “A” que hace referencia al “Área” y su numeración (01, 02, 03...n). Por ejemplo, el primer glaciar pertenece al sector Alto Marañón en la PEH sería “AltoMPEH\_A01”. Para esta notación se ha utilizado como base el *Shape* de Cuencas Hidrográficas del ANA.

En las Tablas 10, 11 y 12, se detalla los valores de área (m<sup>2</sup>) para cada glaciar de la Cordillera Huayhuash, en los diferentes periodos (PEH, 1962 y el año 2017):

Tabla 10

*Detalle de las áreas de glaciares del sector Alto Marañón en los 3 periodos*

N°	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )
1	AltoMPEH_A01	1.795	AltoM62_A01	0.362	AltoM17_A01	0.508
2	AltoMPEH_A02	1.196	AltoM62_A02	0.079	AltoM17_A02	0.201
3	AltoMPEH_A03	0.092	AltoM62_A03	0.202	AltoM17_A03	0.353
4	AltoMPEH_A04	0.411	AltoM62_A04	0.287	AltoM17_A04	0.172
5	AltoMPEH_A05	0.538	AltoM62_A05	0.199	AltoM17_A05	0.470
6	AltoMPEH_A06	0.735	AltoM62_A06	0.588	AltoM17_A06	0.258
7	AltoMPEH_A07	0.097	AltoM62_A07	0.358	AltoM17_A07	0.187
8	AltoMPEH_A08	0.734	AltoM62_A08	0.209	AltoM17_A08	0.381
9	AltoMPEH_A09	0.646	AltoM62_A09	0.533	AltoM17_A09	0.079
10	AltoMPEH_A10	0.931	AltoM62_A10	0.599	AltoM17_A10	1.597
11	AltoMPEH_A11	0.316	AltoM62_A11	0.495	AltoM17_A11	0.160
12	AltoMPEH_A12	0.324	AltoM62_A12	0.216	AltoM17_A12	0.110
13	AltoMPEH_A13	0.312	AltoM62_A13	0.340	AltoM17_A13	0.187
14	AltoMPEH_A14	1.451	AltoM62_A14	0.434	AltoM17_A14	1.037
15	AltoMPEH_A15	0.343	AltoM62_A15	0.091	AltoM17_A15	0.247
16	AltoMPEH_A16	5.119	AltoM62_A16	0.648	AltoM17_A16	0.096
17	AltoMPEH_A17	2.928	AltoM62_A17	0.413	AltoM17_A17	0.151
18	AltoMPEH_A18	0.408	AltoM62_A18	0.269	AltoM17_A18	0.330
19	AltoMPEH_A19	0.699	AltoM62_A19	0.402	AltoM17_A19	0.224
20	AltoMPEH_A20	0.508	AltoM62_A20	1.876	AltoM17_A20	0.402
21	AltoMPEH_A21	1.099	AltoM62_A21	1.607	AltoM17_A21	0.050
22	AltoMPEH_A22	0.315	AltoM62_A22	1.257	AltoM17_A22	0.222
23	AltoMPEH_A23	0.910	AltoM62_A23	0.071	AltoM17_A23	0.422
24	AltoMPEH_A24	0.444	AltoM62_A24	0.324	AltoM17_A24	0.150
25	AltoMPEH_A25	1.572	AltoM62_A25	0.126	AltoM17_A25	0.186
26			AltoM62_A26	0.144	AltoM17_A26	1.721
27			AltoM62_A27	0.296	AltoM17_A27	0.083
28			AltoM62_A28	2.064	AltoM17_A28	0.030
29			AltoM62_A29	0.330	AltoM17_A29	0.017
30			AltoM62_A30	0.589	AltoM17_A30	0.113
31			AltoM62_A31	0.304	AltoM17_A31	2.047
32			AltoM62_A32	0.028	AltoM17_A32	0.028
33			AltoM62_A33	0.136		
34			AltoM62_A34	0.147		
Total		23.924		16.024		12.217

Tabla 11

*Detalle de las áreas de glaciares del sector Rapay en los 3 periodos*

N°	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )
1	RapayPEH_A01	0.235	Rapay62_A01	0.185	Rapay17_A01	0.144
2	RapayPEH_A02	0.915	Rapay62_A02	0.106	Rapay17_A02	0.041
3	RapayPEH_A03	5.480	Rapay62_A03	0.218	Rapay17_A03	0.135
4	RapayPEH_A04	4.796	Rapay62_A04	0.302	Rapay17_A04	0.190
5	RapayPEH_A05	0.066	Rapay62_A05	0.963	Rapay17_A05	0.066
6	RapayPEH_A06	0.600	Rapay62_A06	0.066	Rapay17_A06	0.014
7	RapayPEH_A07	1.497	Rapay62_A07	1.136	Rapay17_A07	0.118
8	RapayPEH_A08	0.057	Rapay62_A08	1.611	Rapay17_A08	0.163
9	RapayPEH_A09	0.516	Rapay62_A09	0.570	Rapay17_A09	0.076
10	RapayPEH_A10	0.901	Rapay62_A10	2.079	Rapay17_A10	0.154
11	RapayPEH_A11	1.974	Rapay62_A11	1.570	Rapay17_A11	0.238
12	RapayPEH_A12	0.105	Rapay62_A12	0.038	Rapay17_A12	0.614
13	RapayPEH_A13	0.701	Rapay62_A13	0.220	Rapay17_A13	0.456
14	RapayPEH_A14	0.112	Rapay62_A14	0.134	Rapay17_A14	0.094
15	RapayPEH_A15	0.971	Rapay62_A15	0.250	Rapay17_A15	0.084
16	RapayPEH_A16	0.824	Rapay62_A16	0.091	Rapay17_A16	0.562
17	RapayPEH_A17	0.061	Rapay62_A17	0.937	Rapay17_A17	0.779
18	RapayPEH_A18	0.076	Rapay62_A18	0.079	Rapay17_A18	0.086
19	RapayPEH_A19	0.377	Rapay62_A19	0.254	Rapay17_A19	0.094
20	RapayPEH_A20	0.516	Rapay62_A20	0.775	Rapay17_A20	0.039
21	RapayPEH_A21	0.385	Rapay62_A21	0.509	Rapay17_A21	0.574
22	RapayPEH_A22	0.205	Rapay62_A22	0.721	Rapay17_A22	0.070
23	RapayPEH_A23	0.194	Rapay62_A23	0.157	Rapay17_A23	0.092
24	RapayPEH_A24	0.151	Rapay62_A24	0.149	Rapay17_A24	0.087
25	RapayPEH_A25	2.055	Rapay62_A25	0.091	Rapay17_A25	1.593
26			Rapay62_A26	0.108	Rapay17_A26	0.604
27			Rapay62_A27	1.188	Rapay17_A27	1.232
28			Rapay62_A28	0.347	Rapay17_A28	0.092
29			Rapay62_A29	1.990	Rapay17_A29	0.550
30			Rapay62_A30	0.156	Rapay17_A30	1.591
31			Rapay62_A31	0.092	Rapay17_A31	1.161
32					Rapay17_A32	0.495
33					Rapay17_A33	0.143
Total		23.772		17.094		12.429

Tabla 12

*Detalle de las áreas de glaciares del sector Achin en los 3 periodos.*

N°	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )	Glaciar	Área (km <sup>2</sup> )
1	AchinPEH_A01	1.875	Achin62_A01	1.875	Achin17_A01	1.875
2	AchinPEH_A02	0.427	Achin62_A02	0.427	Achin17_A02	0.427
3	AchinPEH_A03	1.938	Achin62_A03	0.502	Achin17_A03	0.783
4	AchinPEH_A04	0.161	Achin62_A04	0.037	Achin17_A04	2.613
5	AchinPEH_A05	0.239	Achin62_A05	0.448	Achin17_A05	0.162
6	AchinPEH_A06	0.485	Achin62_A06	0.108	Achin17_A06	0.363
7	AchinPEH_A07	0.485	Achin62_A07	0.786	Achin17_A07	0.502
8	AchinPEH_A08	0.311	Achin62_A08	0.803	Achin17_A08	0.166
9	AchinPEH_A09	0.877	Achin62_A09	0.194	Achin17_A09	0.137
10	AchinPEH_A10	0.305	Achin62_A10	2.771	Achin17_A10	0.052
11	AchinPEH_A11	0.357	Achin62_A11	1.270	Achin17_A11	0.074
12	AchinPEH_A12	1.310	Achin62_A12	1.008	Achin17_A12	0.547
13	AchinPEH_A13	3.260	Achin62_A13	0.347	Achin17_A13	0.673
14	AchinPEH_A14	0.250	Achin62_A14	0.039	Achin17_A14	0.177
15	AchinPEH_A15	0.052	Achin62_A15	0.276	Achin17_A15	0.112
16	AchinPEH_A16	0.528	Achin62_A16	0.590	Achin17_A16	0.053
17	AchinPEH_A17	0.748	Achin62_A17	0.273	Achin17_A17	1.101
18	AchinPEH_A18	0.474	Achin62_A18	0.256		
19	AchinPEH_A19	1.445	Achin62_A19	0.121		
20	AchinPEH_A20	0.233				
21	AchinPEH_A21	1.266				
22	AchinPEH_A22	0.565				
Total		17.598		12.132		9.817



Como se observa en las Tablas 10, 11 y 12, el glaciar de mayor dimensión en la PEH se ubicó en el sector Rapay con un área de 5.480 km<sup>2</sup> y el paleoglaciar menor dimensión, extinto en la actualidad, se encontraba en el sector Achin ocupando un área de 0.052 km<sup>2</sup>. Para el periodo 1962, el glaciar de mayor dimensión perteneció al sector de Achin con un área de 2.771 km<sup>2</sup> y el de menor dimensión al sector del Alto Marañón de área 0.028 km<sup>2</sup>. En el periodo 2017 el glaciar de mayor dimensión aún se ubica en el sector Achin, con un área de 2.613 km<sup>2</sup> y el glaciar de menor dimensión con 0.014 km<sup>2</sup> de área en el sector Rapay.

La Tabla 13, muestra la distribución glaciar en la Cordillera Huayhuash, detallando para los tres periodos el área glaciar (km<sup>2</sup>) y la proporción (%) ocupada por el área glaciar de cada sector en el área total de la cordillera.

Tabla 13

*Distribución del área glaciar de la Cordillera Huayhuash por sector y periodo.*

Sector	Glaciares en la PEH		Glaciares en 1962		Glaciares en 2017	
	Área (km <sup>2</sup> )	(%)	Área (km <sup>2</sup> )	(%)	Área (km <sup>2</sup> )	(%)
Alto Marañón	23.924	36.65	16.024	35.41	12.217	35.45
Rapay	23.772	36.41	17.094	37.78	12.429	36.06
Achin	17.589	26.94	12.132	26.81	9.817	28.49
Total	65.285	100.00	45.250	100.00	34.463	100.00

La masa glaciar de cada uno de los sectores Achin, Rapay y Alto Marañón, representan una proporción determinada de la superficie total de la Cordillera Huayhuash, esta representatividad del área ha variado desde la PEH al año 1962 y al año 2017, siendo Rapay el sector más representativo en el año 2017 (36%) y 1962 (38%). Sin embargo, se observa que en la PEH el sector que concentraba mayor área de masa glaciar fue el Alto Marañón (37%). El sector menos representativo para todos los periodos es Achin con 28% en el 2017 y 27% en 1962 y la PEH.

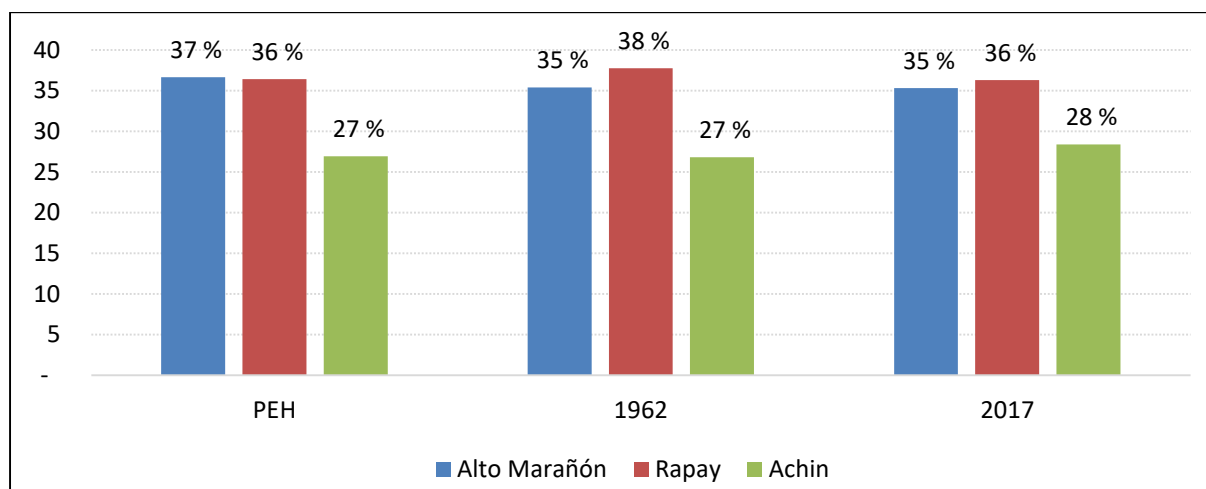


Figura 41. Muestra la representatividad de cada sector en la Cordillera respecto al área de masa glaciar en los periodos PEH, 1962 y el 2017.

En cuanto a la evolución del área glaciar de la Cordillera Huayhuash, la Tabla 14, muestra a detalle el área glaciar perdida por periodo en cada sector de la Cordillera, representada en km<sup>2</sup> y en porcentajes (%).

Tabla 14

*Evolución del área glaciar de la Cordillera Huayhuash.*

Sector	Área Glaciar en la PEH (km <sup>2</sup> )	Área Perdida de la PEH al año 1962		Área Glaciar en 1962 (km <sup>2</sup> )	Área Perdida de 1962 al año 2017		Área Glaciar en 2017 (km <sup>2</sup> )	Área Perdida de la PEH al año 2017	
		(km <sup>2</sup> )	(%)		(km <sup>2</sup> )	(%)		(km <sup>2</sup> )	(%)
Alto Marañón	23.925	7.901	33	16.024	3.807	24	12.217	11.707	49
Rapay	23.772	6.678	28	17.094	4.665	27	12.429	11.343	48
Achin	17.589	5.458	31	12.132	2.315	19	9.818	7.772	44
Total	65.286	20.037	31	45.250	10.787	24	34.464	30.822	47

Se observa que el área total que presentaba la cordillera Huayhuash en la PEH fue de 65.286 km<sup>2</sup>, para el año 1962 se reduce a 45.250 km<sup>2</sup> de área glaciar, para el año 2017, los 65.286 km<sup>2</sup> de área glaciar de la PEH, se reducen a 34.464 km<sup>2</sup>, es decir, desde la PEH al año 1962 la cordillera Huayhuash perdió 20.037 km<sup>2</sup> y 30.822 km<sup>2</sup> de área glaciar al año 2017.

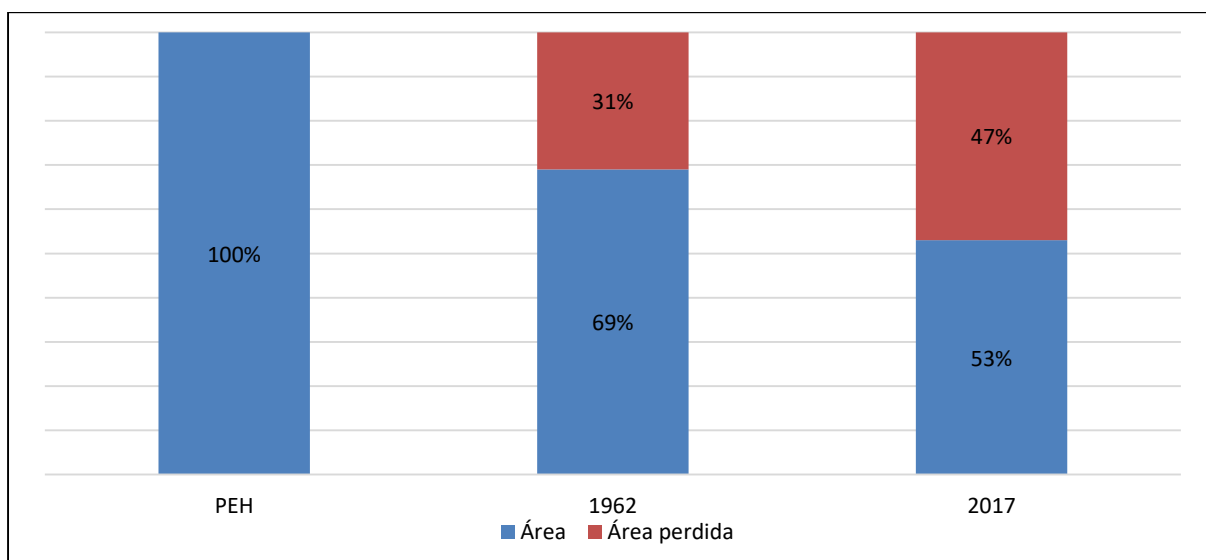


Figura 42. Área glaciara de la cordillera Huayhuash por cada periodo.

En términos porcentuales, de los 65.286 km<sup>2</sup> de área glaciara que presentaba la Cordillera Huayhuash en la PEH, al año 1962 perdió el 31% de área glaciara. Al año 2017 el área glaciara perdida equivale al 47% del área inicial presentada en la PEH.

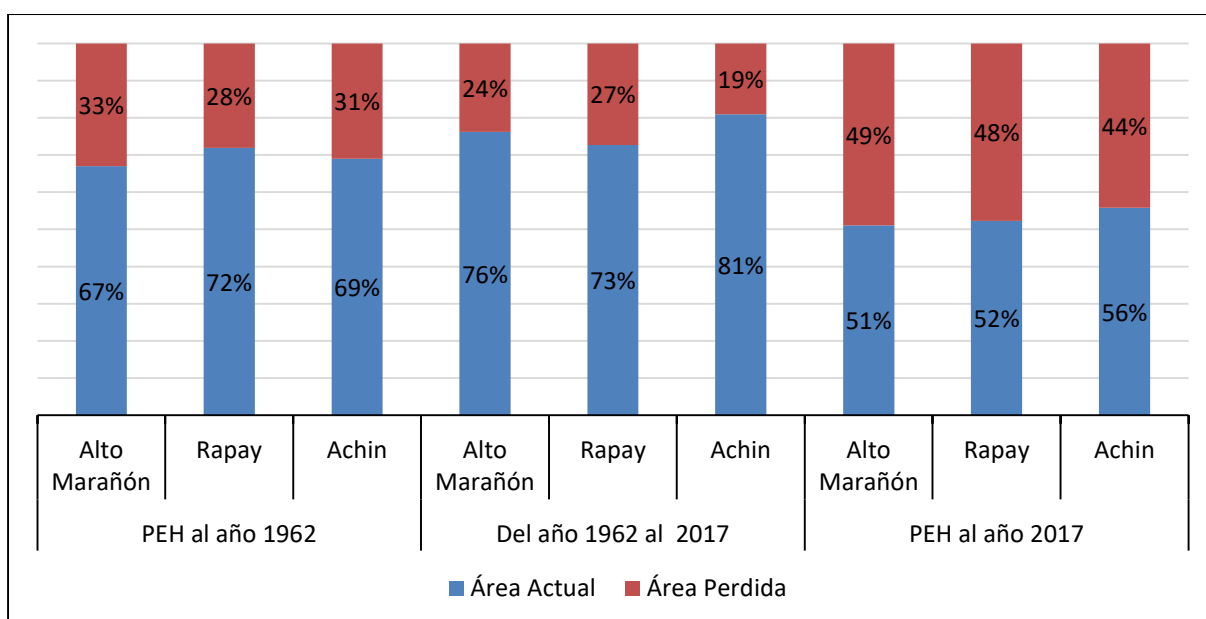


Figura 43. Proporción de pérdida de área glaciara por sector.

En 55 años, es decir, desde el año 1962 al año 2017, se observa que de los 45.250 km<sup>2</sup> que presentaba la Cordillera Huayhuash en 1962, al 2017 se redujo a 34.464 km<sup>2</sup>, es decir la cordillera perdió un total de 10.787 km<sup>2</sup> lo que equivale al 24% del área presentada en 1962.

Respecto a la evolución del área glaciara (km<sup>2</sup>) y la proporción (%) de área perdida de cada sector, se observa que el sector Alto Marañón al año 1962 perdió 7.901 km<sup>2</sup>, es decir, el

33% de su área glaciaria inicial, elevándose a 49% al año 2017, siendo este el porcentaje de área perdida más significativo con 11.707 km<sup>2</sup> de área perdida.

En tanto, Achin desde la PEH al año 1962 presenta una pérdida total del 5.458 km<sup>2</sup>, lo que equivale al 31% de su área glaciaria inicial. Al año 2017 la pérdida asciende a 7.772 km<sup>2</sup> siendo 44% el porcentaje de área perdida.

Así mismo, en Rapay la pérdida del área glaciaria desde la PEH al año 1962 es de 6.678 km<sup>2</sup> equivalente al 28%. Al 2017 el porcentaje asciende a 48% con 11.343 km<sup>2</sup> de área glaciaria perdida desde la PEH.

En cuanto al área perdida por cada sector de la cordillera en 55 años, se observa que Alto Marañón pierde 3.807 km<sup>2</sup>, es decir, 24 % de su área inicial presentada en 1962, Rapay pierde 4.665 km<sup>2</sup> equivalente al 27% y el sector Achin 19 % con 2.315 km<sup>2</sup> de área perdida.

#### **4.2. Estimación del volumen glaciario para la PEH, el año de 1962 y 2017.**

Estimar el volumen también requirió del empleo de una nomenclatura, la misma que lleva el nombre del sector al cual pertenece el glaciar, el periodo, la letra "V" que hace referencia al "Volumen" y su numeración (01, 02, 03...n). Por ejemplo, el primer glaciar pertenece al sector Alto Marañón, empleando la nomenclatura su denominación en la PEH sería "AltoMPEH\_V01", si el glaciar pertenece al período de 1962 su nomenclatura sería "AltoM62\_V01" y si se trata de un glaciar del 2017 sería "AltoM17\_V01". Para esta notación se ha utilizado como referencia las cuencas y subcuencas hidrográficas del ANA.

En las Tablas 15,16 y 17, se detalla los valores del volumen (Mm<sup>3</sup>) para cada glaciar de la Cordillera Huayhuash, en los diferentes periodos (PEH, el año 1962 y 2017):

Tabla 15

*Detalle el volumen de los glaciares del sector Alto Marañón en los 3 periodos.*

Nº	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )
1	AltoMPEH_V01	32.674	AltoM62_V01	13.335	AltoM17_V01	0.152
2	AltoMPEH_V02	29.541	AltoM62_V02	2.585	AltoM17_V02	0.036
3	AltoMPEH_V03	104.827	AltoM62_V03	15.044	AltoM17_V03	5.204
4	AltoMPEH_V04	53.566	AltoM62_V04	8.569	AltoM17_V04	4.285
5	AltoMPEH_V05	21.705	AltoM62_V05	24.561	AltoM17_V05	13.329
6	AltoMPEH_V06	42.923	AltoM62_V06	27.705	AltoM17_V06	13.306
7	AltoMPEH_V07	26.812	AltoM62_V07	24.718	AltoM17_V07	7.454
8	AltoMPEH_V08	18.124	AltoM62_V08	13.769	AltoM17_V08	3.548
9	AltoMPEH_V09	17.710	AltoM62_V09	4.626	AltoM17_V09	1.394
10	AltoMPEH_V10	107.300	AltoM62_V10	5.228	AltoM17_V10	4.767
11	AltoMPEH_V11	72.762	AltoM62_V11	13.078	AltoM17_V11	1.154
12	AltoMPEH_V12	35.136	AltoM62_V12	8.292	AltoM17_V12	1.590
13	AltoMPEH_V13	15.173	AltoM62_V13	7.460	AltoM17_V13	5.518
14	AltoMPEH_V14	428.442	AltoM62_V14	23.574	AltoM17_V14	38.475
15	AltoMPEH_V15	2.962	AltoM62_V15	51.657	AltoM17_V15	3.040
16	AltoMPEH_V16	230.346	AltoM62_V16	11.058	AltoM17_V16	0.755
17	AltoMPEH_V17	16.121	AltoM62_V17	13.200	AltoM17_V17	2.805
18	AltoMPEH_V18	33.115	AltoM62_V18	7.849	AltoM17_V18	88.059
19	AltoMPEH_V19	20.532	AltoM62_V19	127.864	AltoM17_V19	77.017
20	AltoMPEH_V20	58.845	AltoM62_V20	98.780	AltoM17_V20	0.701
21	AltoMPEH_V21	59.272	AltoM62_V21	1.963	AltoM17_V21	4.187
22	AltoMPEH_V22	14.962	AltoM62_V22	19.871	AltoM17_V22	87.524
23	AltoMPEH_V23	3.060	AltoM62_V23	108.323	AltoM17_V23	3.714
24	AltoMPEH_V24	18.388	AltoM62_V24	12.577	AltoM17_V24	2.218
25	AltoMPEH_V25	76.569	AltoM62_V25	7.943	AltoM17_V25	9.793
26			AltoM62_V26	15.089	AltoM17_V26	3.276
27			AltoM62_V27	12.514	AltoM17_V27	8.456
28			AltoM62_V28	23.024	AltoM17_V28	1.732
29			AltoM62_V29	15.598	AltoM17_V29	0.931
30			AltoM62_V30	6.519	AltoM17_V30	0.162
31			AltoM62_V31	0.745	AltoM17_V31	0.401
32			AltoM62_V32	7.723	AltoM17_V32	8.040
33			AltoM62_V33	2.791		
34			AltoM62_V34	42.666		
Total		1,540.865		780.302		403.021

Tabla 16

*Detalle el volumen de los glaciares del sector Rapay en los 3 periodos.*

N°	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar 1962	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar 2017	Área (Mm <sup>3</sup> )
1	RapayPEH_V01	565.014	Rapay62_V01	173.692	Rapay17_V01	73.943
2	RapayPEH_V02	1.672	Rapay62_V02	113.563	Rapay17_V02	45.252
3	RapayPEH_V03	51.048	Rapay62_V03	68.782	Rapay17_V03	17.511
4	RapayPEH_V04	11.059	Rapay62_V04	3.399	Rapay17_V04	1.368
5	RapayPEH_V05	468.239	Rapay62_V05	1.336	Rapay17_V05	0.438
6	RapayPEH_V06	27.098	Rapay62_V06	23.138	Rapay17_V06	13.152
7	RapayPEH_V07	117.321	Rapay62_V07	7.366	Rapay17_V07	1.944
8	RapayPEH_V08	3.756	Rapay62_V08	176.682	Rapay17_V08	72.079
9	RapayPEH_V09	28.097	Rapay62_V09	126.036	Rapay17_V09	43.531
10	RapayPEH_V10	53.295	Rapay62_V10	11.282	Rapay17_V10	3.206
11	RapayPEH_V11	178.184	Rapay62_V11	7.768	Rapay17_V11	1.506
12	RapayPEH_V12	4.670	Rapay62_V12	71.006	Rapay17_V12	10.837
13	RapayPEH_V13	65.844	Rapay62_V13	1.458	Rapay17_V13	0.322
14	RapayPEH_V14	4.989	Rapay62_V14	11.127	Rapay17_V14	2.129
15	RapayPEH_V15	3.891	Rapay62_V15	6.516	Rapay17_V15	0.029
16	RapayPEH_V16	2.192	Rapay62_V16	5.730	Rapay17_V16	1.764
17	RapayPEH_V17	169.512	Rapay62_V17	11.350	Rapay17_V17	1.418
18	RapayPEH_V18	27.420	Rapay62_V18	17.610	Rapay17_V18	0.785
19	RapayPEH_V19	27.438	Rapay62_V19	122.830	Rapay17_V19	2.197
20	RapayPEH_V20	9.488	Rapay62_V20	3.293	Rapay17_V20	3.679
21	RapayPEH_V21	19.465	Rapay62_V21	32.727	Rapay17_V21	16.375
22	RapayPEH_V22	3.617	Rapay62_V22	4.120	Rapay17_V22	0.679
23	RapayPEH_V23	10.236	Rapay62_V23	2.783	Rapay17_V23	10.912
24	RapayPEH_V24	69.695	Rapay62_V24	11.375	Rapay17_V24	0.967
25	RapayPEH_V25	48.897	Rapay62_V25	3.316	Rapay17_V25	0.642
26			Rapay62_V26	39.340	Rapay17_V26	11.556
27			Rapay62_V27	69.602	Rapay17_V27	22.146
28			Rapay62_V28	44.790	Rapay17_V28	0.843
29			Rapay62_V29	5.335	Rapay17_V29	0.981
30			Rapay62_V30	7.026	Rapay17_V30	10.817
31			Rapay62_V31	2.901	Rapay17_V31	1.381
32					Rapay17_V32	1.226
33					Rapay17_V33	0.246
Total		1,972.135		1,187.279		375.860

Tabla 17

*Detalle el volumen de los glaciares del sector Achin en los 3 periodos.*

Nº	PEH		1962		2017	
	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )	Glaciar	Área (Mm <sup>3</sup> )
1	AchinPEH_V01	33.873	Achin62_V01	17.391	Achin17_V01	1.764
2	AchinPEH_V02	26.270	Achin62_V02	7.240	Achin17_V02	2.023
3	AchinPEH_V03	59.570	Achin62_V03	31.991	Achin17_V03	0.687
4	AchinPEH_V04	77.367	Achin62_V04	3.248	Achin17_V04	0.671
5	AchinPEH_V05	8.806	Achin62_V05	32.881	Achin17_V05	15.899
6	AchinPEH_V06	103.731	Achin62_V06	57.864	Achin17_V06	12.251
7	AchinPEH_V07	16.131	Achin62_V07	12.008	Achin17_V07	2.575
8	AchinPEH_V08	53.196	Achin62_V08	23.230	Achin17_V08	15.011
9	AchinPEH_V09	24.144	Achin62_V09	16.977	Achin17_V09	7.204
10	AchinPEH_V10	14.847	Achin62_V10	10.477	Achin17_V10	2.670
11	AchinPEH_V11	13.850	Achin62_V11	233.442	Achin17_V11	171.308
12	AchinPEH_V12	24.851	Achin62_V12	86.158	Achin17_V12	64.985
13	AchinPEH_V13	11.839	Achin62_V13	69.319	Achin17_V13	39.219
14	AchinPEH_V14	329.829	Achin62_V14	123.265	Achin17_V14	82.004
15	AchinPEH_V15	112.884	Achin62_V15	17.486	Achin17_V15	8.254
16	AchinPEH_V16	205.470	Achin62_V16	8.006	Achin17_V16	0.509
17	AchinPEH_V17	149.536	Achin62_V17	9.064	Achin17_V17	1.727
18	AchinPEH_V18	21.039	Achin62_V18	1.853		
19	AchinPEH_V19	12.895	Achin62_V19	1.606		
20	AchinPEH_V20	24.212				
21	AchinPEH_V21	3.809				
22	AchinPEH_V22	57.583				
Total		1,385.732		763.507		428.762

Como se observa en las Tablas 15, 16 y 17, en la PEH los 22 paleoglaciares del sector Achin presentaron un volumen de 1,385.732 Mm<sup>3</sup>, los 25 paleoglaciares de Rapay 1,972.135 Mm<sup>3</sup> y el sector Alto Marañón con sus 25 paleoglaciares un volumen de 1,540.865 Mm<sup>3</sup>. En conclusión, los 72 paleoglaciares de la PEH de la Cordillera Huayhuash presentaron 4,898.731 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar.

Para el periodo 1962, Alto Marañón con sus 34 glaciares tuvo un volumen de 780.302 Mm<sup>3</sup>, los 31 glaciares de Rapay 1,187.279 Mm<sup>3</sup> y los 19 glaciares del sector Achin 763.507

Mm<sup>3</sup>. En conclusión, los 84 glaciares que tuvo la Cordillera Huayhuash en el año 1962 presentaron 2,731.087 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar.

Finalmente, para el año 2017, se observa que Alto Marañón presenta 32 glaciares con un volumen de 403.021 Mm<sup>3</sup>, los 33 glaciares de Rapay un volumen de 375.860 Mm<sup>3</sup> y el sector Achin con sus 17 glaciares un volumen de 428.762 Mm<sup>3</sup>. En conclusión, en el año 2017 los 82 glaciares de la cordillera Huayhuash presentaron 1,207.643 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar.

Además, se aprecia que el glaciar de mayor y menor volumen en la PEH se ubicó en el sector Rapay con 565.014 Mm<sup>3</sup> y 1.672 Mm<sup>3</sup> respectivamente. Para el periodo 1962, el glaciar de mayor volumen perteneció al sector de Achin con 233.442 Mm<sup>3</sup> y el de menor volumen al sector del Alto Marañón con 0.745 Mm<sup>3</sup>. En el periodo 2017 el glaciar de mayor volumen se ubica en el sector Achin con un 171.308 Mm<sup>3</sup> y el glaciar de menor volumen con 0.029 Mm<sup>3</sup> en el sector Rapay.

La Tabla 18, muestra la distribución del volumen glaciar (Mm<sup>3</sup>) en la Cordillera Huayhuash y la proporción (%) de volumen ocupado por cada sector, detallado para los tres periodos.

Tabla 18

*Distribución del volumen glaciar de la Cordillera Huayhuash por sector y periodo.*

Sector	Glaciares en la PEH		Glaciares en 1962		Glaciares en 2017	
	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)
Alto Marañón	1,540.865	31.45	780.302	28.57	403.021	33.37
Rapay	1,972.135	40.26	1,187.279	43.47	375.860	31.12
Achin	1,385.732	28.29	763.507	27.96	428.762	35.50
Total	4,898.732	100.00	2,731.088	100.00	1,207.643	100.00

Al igual que con los valores del área glaciar, se observa una variación en la representatividad de cada sector desde la PEH al año 1962 y al 2017, siendo Rapay el sector más representativo en la PEH (40%) y en 1962 (43%). Al año 2017, se observa que el sector



que concentra el mayor volumen de masa glaciaria es Achin (36%), sin embargo, fue el sector menos representativo en la PEH (28%) y en 1962 (28%).

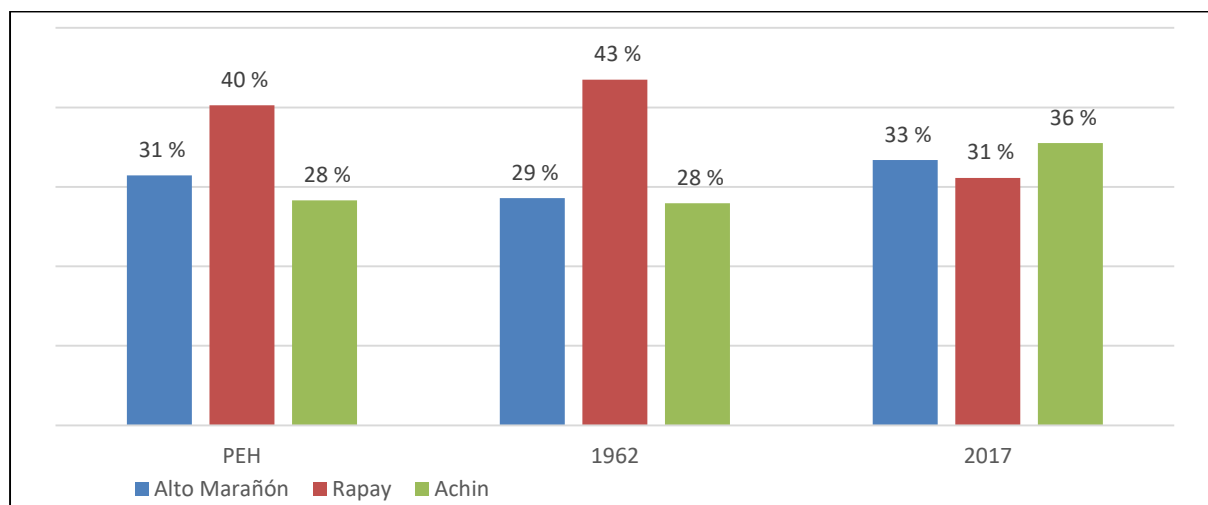


Figura 44. Representatividad (%) del volumen por sector en cada periodo.

En cuanto a la evolución del volumen glaciario de la Cordillera Huayhuash, la Tabla 19, muestra a detalle el volumen glaciario perdido por periodo en cada sector de la Cordillera, representada en  $Mm^3$  y en porcentajes.

Tabla 19

*Evolución del volumen glaciario de la Cordillera Huayhuash.*

Sector	Volumen Glaciario en la PEH ( $Mm^3$ )	Volumen Perdido de la PEH al año 1962		Volumen Glaciario en 1962 ( $Mm^3$ )	Volumen Perdido del año 1962 al 2017		Volumen Glaciario en 2017 ( $Mm^3$ )	Volumen Perdido de la PEH al año 2017	
		( $Mm^3$ )	(%)		( $Mm^3$ )	(%)		( $Mm^3$ )	(%)
Alto Marañón	1540.865	760.563	49	780.302	377.281	48	403.021	1137.844	74
Rapay	1972.135	784.856	40	1187.279	811.419	68	375.860	1596.275	81
Achin	1385.732	622.225	45	763.507	334.745	44	428.762	956.970	69
Total	4898.731	2167.644	44	2731.087	1523.445	56	1207.643	3691.089	75

El volumen total que presentaba la Cordillera Huayhuash en la PEH fue de 4,898.731  $Mm^3$ , para el año 1962 se redujo a 2,731.087  $Mm^3$ , para el año 2017, los 4,898.731  $Mm^3$  de volumen glaciario de la PEH, se redujeron a 1,207.643  $Mm^3$ , es decir, que desde la PEH al año 1962 la cordillera Huayhuash perdió 2,167.644  $Mm^3$  y 3,691.089  $Mm^3$  de volumen glaciario al año 2017.

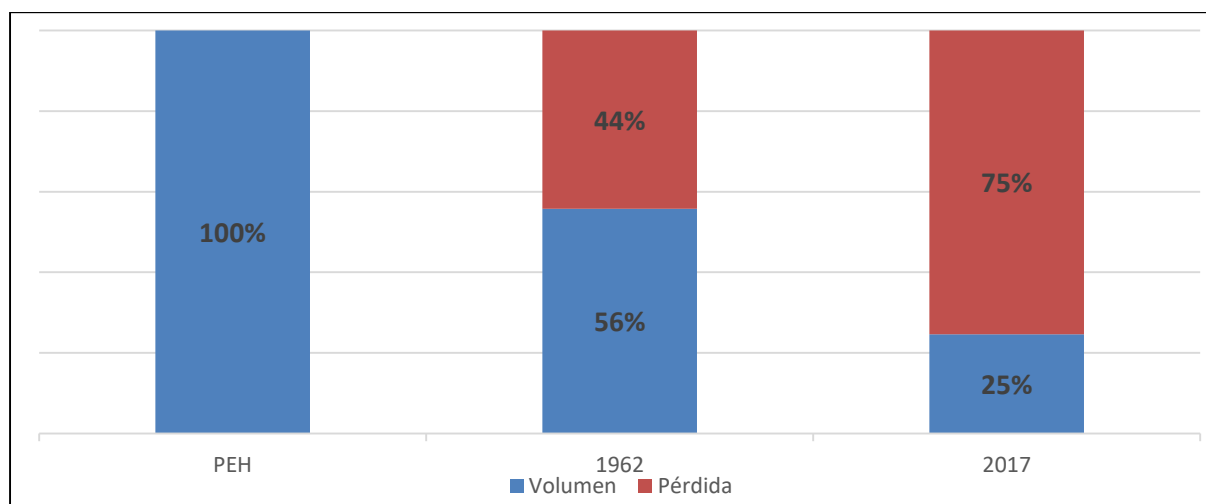


Figura 45. Volumen glaciar de la cordillera Huayhuash por cada periodo.

En términos porcentuales, de los 4,898.731 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar que presentaba la Cordillera Huayhuash en la PEH, al año 1962 perdió el 44%. Al año 2017 el volumen glaciar perdido equivale al 75% del volumen inicial presentado en la PEH.

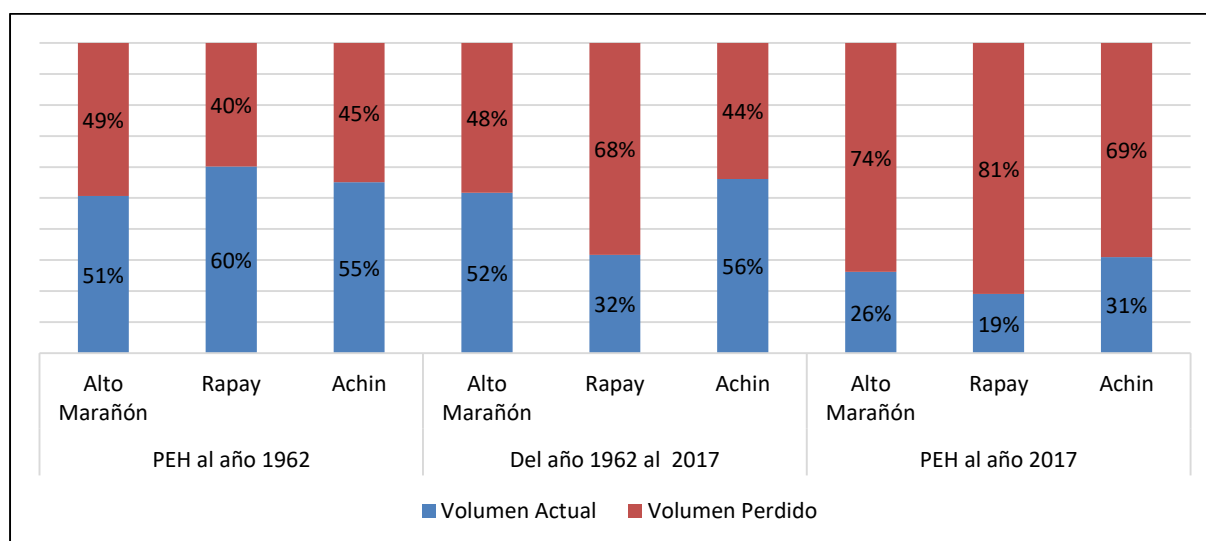


Figura 46. Proporción del volumen glaciar perdido de cada sector en cada intervalo de tiempo.

Respecto a la evolución del volumen glaciar (Mm<sup>3</sup>) y la proporción (%) de volumen perdido de cada sector, se observa que Achin al año 1962 presenta una pérdida total del 622.225 Mm<sup>3</sup>, lo que equivale al 45% de su volumen glaciar inicial. En el periodo comprendido desde la PEH al año 2017, pierde 956.970 Mm<sup>3</sup> siendo 69% el porcentaje de volumen perdido.

En Rapay, la pérdida del volumen glaciar al año 1962 es de 784.856 Mm<sup>3</sup> equivalente al 40%. Al 2017 el porcentaje asciende a 81%, siendo este el valor más significativo con 1,596.275 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar perdido desde la PEH.

Así mismo, el sector Alto Marañón al año 1962 perdió 760.563 Mm<sup>3</sup>, es decir, el 49% de su área glaciár inicial, elevándose a 74% al año 2017 con 1,137.844 Mm<sup>3</sup> de volumen perdido.

Desde el año 1962 al año 2017, se observa que de los 2,731.087 Mm<sup>3</sup> que presentaba la Cordillera Huayhuash en 1962, al 2017 se redujo a 1,207.643 Mm<sup>3</sup>, es decir la cordillera perdió un total de 1,523.445 Mm<sup>3</sup> lo que equivale al 56% del volumen que presentaba en 1962.

En cuanto al volumen perdido por cada sector de la cordillera en 55 años, se observa que Achin pierde 334.745 Mm<sup>3</sup>, es decir, 44% de su volumen inicial presentado en 1962, Rapay pierde 811.419 Mm<sup>3</sup> equivalente al 68% y el sector Alto Marañón 48% con 377.281 Mm<sup>3</sup> de volumen perdido.

#### 4.3. Estimación de la ELA de la PEH, el año 1962 y el 2017.

La herramienta ELA\_Calculation, como se describe en el capítulo 3.5.7, facilitó el proceso de estimación de la ELA glaciár. Cabe resaltar que el parámetro ELA es una isohipsa que divide la zona acumulación de la zona de abrasión del glaciár.

En ese sentido, en las figuras 47 se puede apreciar un modelo espacial de la isohipsa (ELA) para cada periodo de la Cordillera.

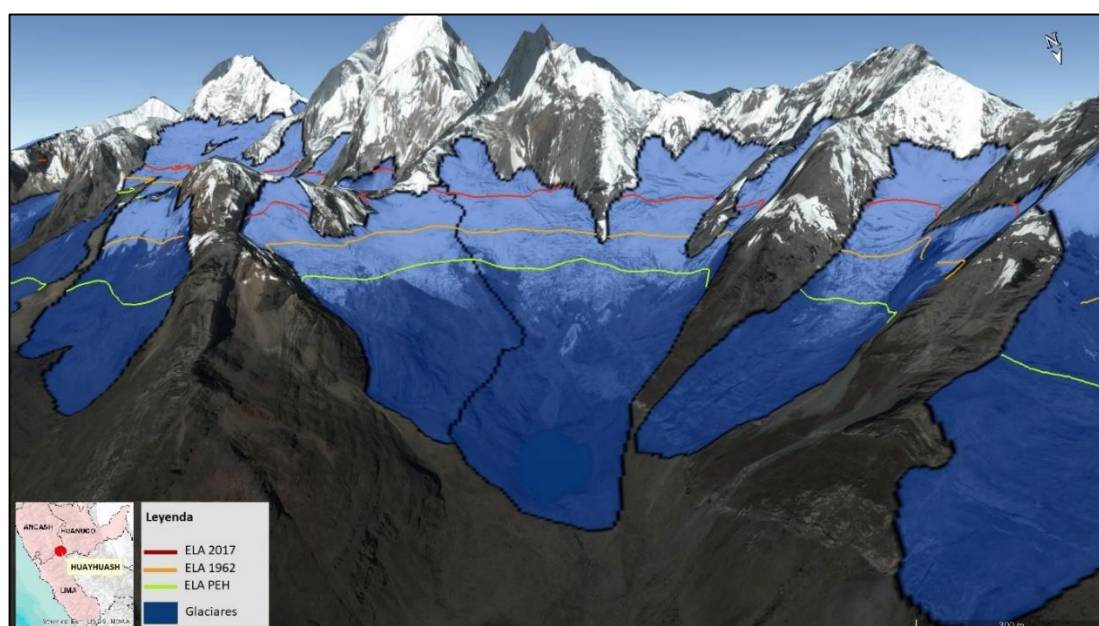


Figura 47. Isohispas que representan las ELAs por periodo (Vista desde el Sector Alto Marañón).

Las siguientes tablas muestran los posibles valores de ELAs cada sector de la Cordillera para cada periodo.

Tabla 20

*Resultados de la estimación de la ELA en la PEH por sector.*

Ratio	Alto Marañón	Rapay	Achin
0.45	5150	5203	5204
0.5	5100	5153	5154
0.55	5100	5103	5104
0.6	5050	5103	5054
0.65	5000	5053	5054
0.7	4950	5003	5004
0.75	4900	5003	4954
0.8	4850	4903	4904
0.9	5100	5103	5104
1	5100	5103	5104
1.1	5050	5053	5104
1.2	5050	5053	5104
1.3	5050	5053	5054
1.4	5050	5053	5054
1.5	5000	5053	5054
1.6	5000	5053	5054
1.7	5000	5053	5054
1.8	5000	5003	5004
<b>1.9</b>	<b>5000</b>	<b>5003</b>	<b>5004</b>
2	5000	5003	5004
2.1	5000	5003	5004
2.2	4950	5003	5004
2.3	4950	5003	5004
2.4	4950	5003	5004
2.5	4950	5003	5004
2.6	4950	5003	4954
2.7	4950	5003	4954
2.8	4950	5003	4954
2.9	4950	4953	4954
3	4950	4953	4954
3.1	4950	4953	4954
3.2	4900	4953	4954
3.3	4900	4953	4954
3.4	4900	4953	4954
3.5	4900	4953	4954
3.6	4900	4953	4904
3.7	4900	4953	4904
3.8	4900	4953	4904
3.9	4900	4953	4904
4	4900	4953	4904
4.1	4900	4953	4904
4.2	4900	4953	4904
4.3	4900	4953	4904
4.4	4900	4953	4904

Tabla 21.

*Resultados de la estimación de la ELA en 1962 por sector.*

Ratio	Alto Marañón	Rapay	Achin
0.4	5316	5266	5362
0.45	5266	5216	5312
0.5	5266	5216	5262
0.55	5216	5166	5262
0.6	5166	5166	5212
0.65	5166	5116	5162
0.7	5116	5116	5112
0.75	5066	5066	5062
0.8	5066	5016	5062
0.9	5216	5166	5262
1	5216	5116	5212
1.1	5216	5116	5212
1.2	5216	5116	5212
1.3	5166	5116	5212
1.4	5166	5116	5212
1.5	5166	5116	5162
1.6	5166	5116	5162
1.7	5166	5116	5162
1.8	5166	5116	5162
<b>1.9</b>	<b>5166</b>	<b>5066</b>	<b>5162</b>
2	5166	5066	5162
2.1	5116	5066	5162
2.2	5116	5066	5112
2.3	5116	5066	5112
2.4	5116	5066	5112
2.5	5116	5066	5112
2.6	5116	5066	5112
2.7	5116	5066	5112
2.8	5116	5066	5112
2.9	5116	5066	5112
3	5116	5066	5112
3.1	5116	5066	5112
3.2	5116	5066	5112
3.3	5116	5016	5062
3.4	5066	5016	5062
3.5	5066	5016	5062
3.6	5066	5016	5062
3.7	5066	5016	5062
3.8	5066	5016	5062
3.9	5066	5016	5062
4	5066	5016	5062
4.1	5066	5016	5062
4.2	5066	5016	5062
4.3	5066	5016	5062
4.4	5066	5016	5062

Tabla 22

*Resultados de la estimación de la ELA en el 2017 por sector.*

Ratio	Alto Marañón	Rapay	Achin
0.4	5391	5237	5409
0.45	5341	5237	5409
0.5	5291	5237	5359
0.55	5291	5187	5309
0.6	5241	5187	5259
0.65	5241	5137	5209
0.7	5191	5137	5209
0.75	5141	5087	5159
0.8	5141	5087	5109
0.9	5291	5187	5309
1	5291	5187	5309
1.1	5291	5187	5259
1.2	5241	5137	5259
1.3	5241	5137	5259
1.4	5241	5137	5259
1.5	5241	5137	5259
1.6	5241	5137	5259
1.7	5241	5137	5209
1.8	5241	5137	5209
<b>1.9</b>	<b>5241</b>	<b>5137</b>	<b>5209</b>
2	5241	5137	5209
2.1	5191	5137	5209
2.2	5191	5137	5209
2.3	5191	5137	5209
2.4	5191	5137	5209
2.5	5191	5087	5209
2.6	5191	5087	5159
2.7	5191	5087	5159
2.8	5191	5087	5159
2.9	5191	5087	5159
3	5191	5087	5159
3.1	5191	5087	5159
3.2	5191	5087	5159
3.3	5191	5087	5159
3.4	5191	5087	5159
3.5	5141	5087	5159
3.6	5141	5087	5159
3.7	5141	5087	5159
3.8	5141	5087	5159
3.9	5141	5087	5159
4	5141	5087	5159
4.1	5141	5087	5109
4.2	5141	5087	5109
4.3	5141	5087	5109
4.4	5141	5087	5109

Tabla 23

Resultados de la estimación de la ELA de la cordillera por periodo.

Ratio	PEH	1962	2017
0.9	5104	5212	5259
1	5104	5212	5259
1.1	5054	5162	5259
1.2	5054	5162	5209
1.3	5054	5162	5209
1.4	5054	5162	5209
1.5	5054	5162	5209
1.6	5054	5162	5209
1.7	5004	5162	5209
1.8	5004	5112	5209
<b>1.9</b>	<b>5004</b>	<b>5112</b>	<b>5209</b>
2	5004	5112	5159
2.1	5004	5112	5159
2.2	5004	5112	5159
2.3	5004	5112	5159
2.4	5004	5112	5159
2.5	4954	5112	5159
2.6	4954	5112	5159
2.7	4954	5112	5159
2.8	4954	5112	5159
2.9	4954	5062	5159
3	4954	5062	5159
3.1	4954	5062	5159
3.2	4954	5062	5159
3.3	4954	5062	5159
3.4	4954	5062	5159
3.5	4954	5062	5109
3.6	4954	5062	5109
3.7	4904	5062	5109
3.8	4904	5062	5109
3.9	4904	5062	5109
4	4904	5062	5109
4.1	4904	5062	5109
4.2	4904	5062	5109
4.3	4904	5062	5109
4.4	4904	5062	5109

La ratio seleccionada para promediar la ELA glaciár fue de 1.9, este valor proviene del intercambio de información con la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Además, considerando que, en la PEH, para el sector Alto Maraón los rangos entre 1.5 a 2.1 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5000 m.s.n.m., el sector Rapay los rangos entre 1.8 a 2.8

de la ratio existe un único valor para la ELA de 5003 m.s.n.m. y Achin entre los rangos 1.8 a 2.5 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5004 m.s.n.m., corroboramos estos valores como los más representativo para los glaciares tropicales de la PEH por sector.

Para el año 1962, en el sector Alto Marañón entre los rangos 1.3 a 2 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5166 m.s.n.m., el sector Rapay los rangos entre 1.9 a 3.2 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5066 m.s.n.m. y Achin entre los rangos 1.5 a 2.1 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5162 m.s.n.m., corroboramos estos valores como los más representativo para los glaciares tropicales del año 1962 por sector.

Para el año 2017, en el sector Alto Marañón entre los rangos 1.2 a 2 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5241 m.s.n.m., el sector Rapay los rangos entre 1.2 a 2.4 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5137 m.s.n.m. y Achin entre los rangos 1.7 a 2.5 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5209 m.s.n.m., corroboramos estos valores como los más representativos para los glaciares tropicales del año 2017 por sector.

Finalmente, se puede observar en la Tabla 23, el valor de la PaleoELA en la Cordillera Huayhuash para la PEH entre los rangos 1.7 a 2.4 de la ratio siendo 5004 m.s.n.m. el único valor, para el año 1962 entre los rangos 1.8 a 2.8 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5112 m.s.n.m. y para el año 2017 entre los rangos 1.2 a 1.9 de la ratio existe un único valor para la ELA de 5209 m.s.n.m., corroboramos estos valores como los más representativos para los glaciares tropicales de la cordillera Huayhuash por periodo.

La Tabla 24, resume el valor de ELA glaciar de cada sector, y el valor final de la ELA glaciar de la Cordillera Huayhuash. Además, muestra el valor del desnivel que se genera de un periodo a otro.



Tabla 24

*Resumen de ELAs por sector y periodo*

Sector	ELA <sub>(PEH)</sub>	$\Delta$ ELA <sub>(PEH-1962)</sub>	ELA <sub>(1962)</sub>	$\Delta$ ELA <sub>(1962-2017)</sub>	ELA <sub>(2017)</sub>	$\Delta$ ELA <sub>(PEH-2017)</sub>
Alto Marañón	5000	166	5166	75	5241	241
Rapay	5003	63	5066	71	5137	134
Achin	5004	158	5162	47	5209	205
Cordillera Huayhuash	5004	108	5112	97	5209	205

De la Tabla 24 se observa que en el sector Alto Marañón, desde la PEH al año 1962, se generó un desnivel de 166 m y desde el año 1962 al 2017 el desnivel es de 75 m, siendo 241 m el desnivel generado por la variación del parámetro ELA desde la PEH al 2017.

Para el sector Rapay, desde la PEH al año 1962 se observa que el valor de la ELA glaciar pasa de 5003 a 5066 m.s.n.m. evidenciando un desnivel de 63 m y del año 1962 al 2017 un desnivel de 71 m. Desde la PEH al 2017 se observa un desnivel de 134 m.

Para el sector Achin, desde la PEH al año 1962 el desnivel fue de 158 m y desde 1962 al 2017 de 47 m, siendo 205 m el desnivel desde la PEH al 2017.

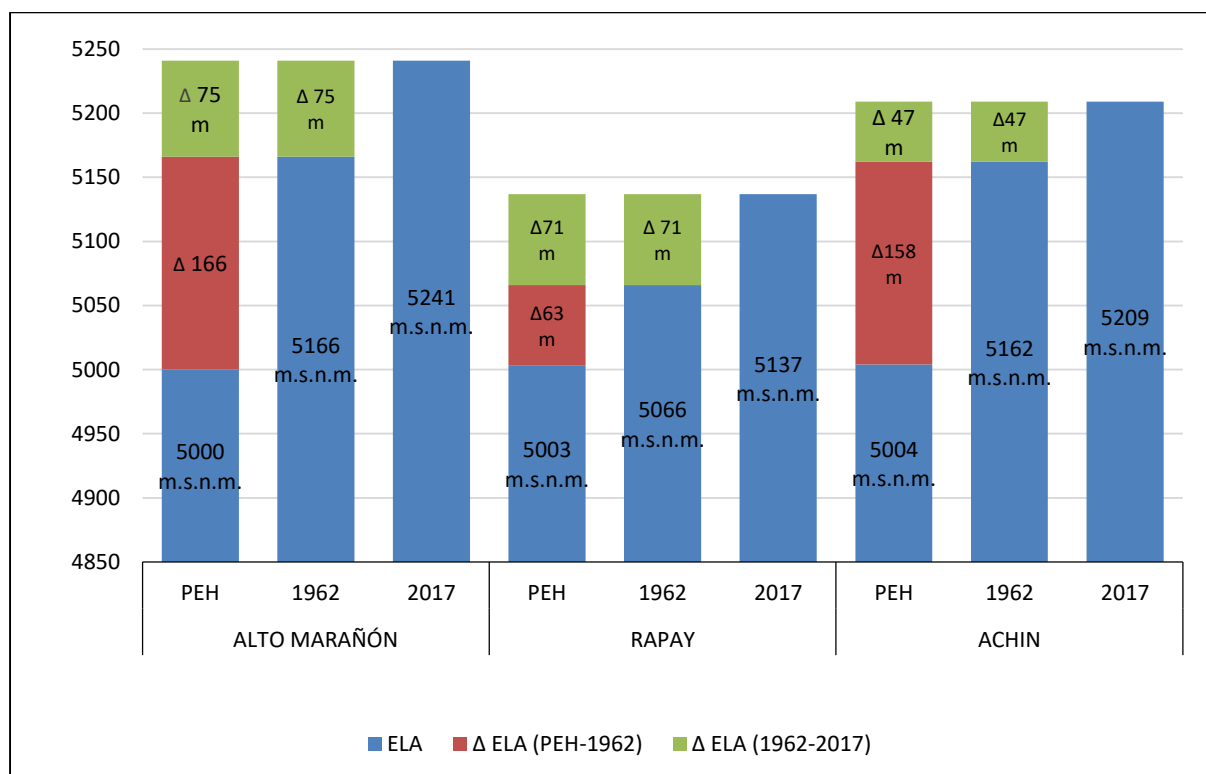


Figura 48. Desnivel de ELA por sector.

Finalmente, la variación de los valores de las ELAs indica que la Cordillera tuvo un desnivel de 108 m desde la PEH al año 1962 y desde 1962 al 2017 un desnivel de 97 m, siendo 205 m el desnivel desde la PEH al 2017.

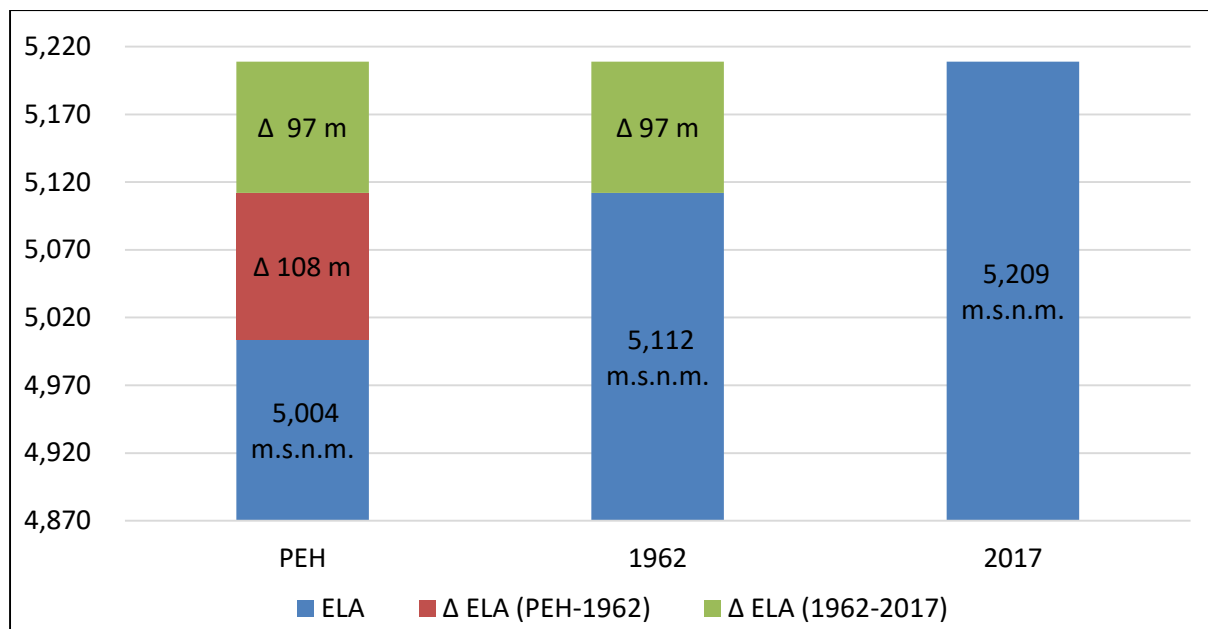


Figura 49. Variación de las ELAs en cada periodo.

La figura 50 muestra un comparativo del desnivel producido por la variación del parámetro ELA desde la PEH al 2017.

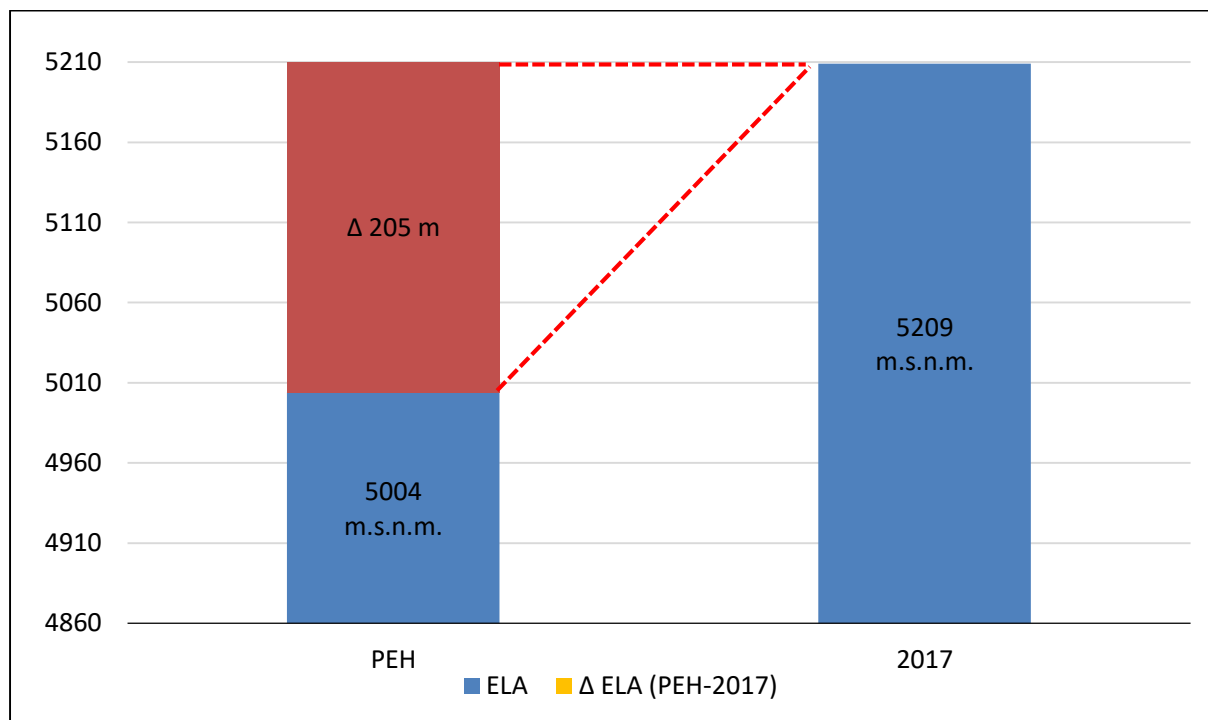


Figura 50. Desnivel de la ELA desde la PEH hasta el año 2017.

La figura 51, 52 y 53, muestran las curvas de nivel correspondiente a cada valor de ELA de la cordillera Huayhuash para los 3 sectores en la PEH, 1962 y 2017.

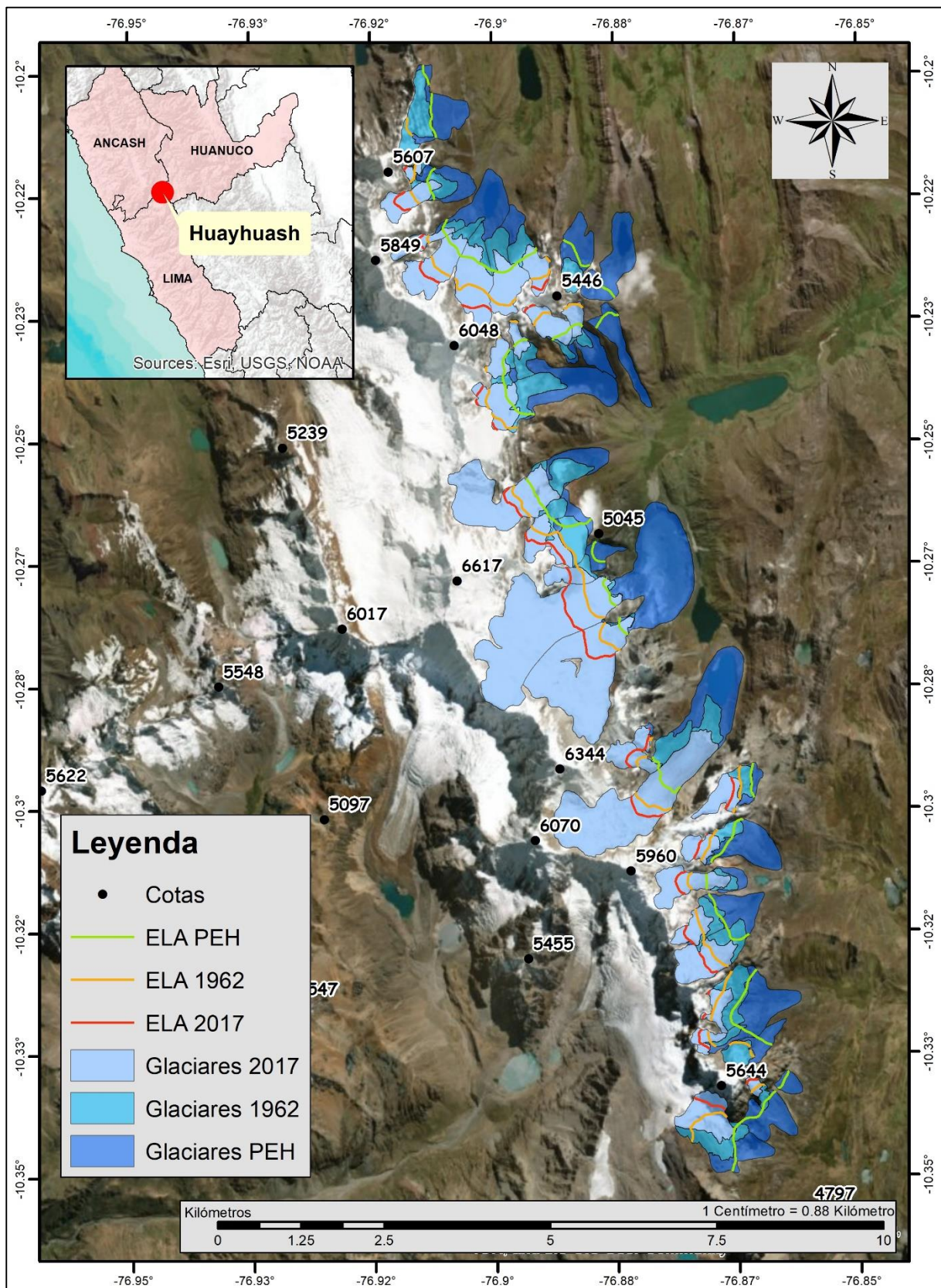


Figura 51. Variación de la ELA en el sector Alto Marañón en los 3 periodos.

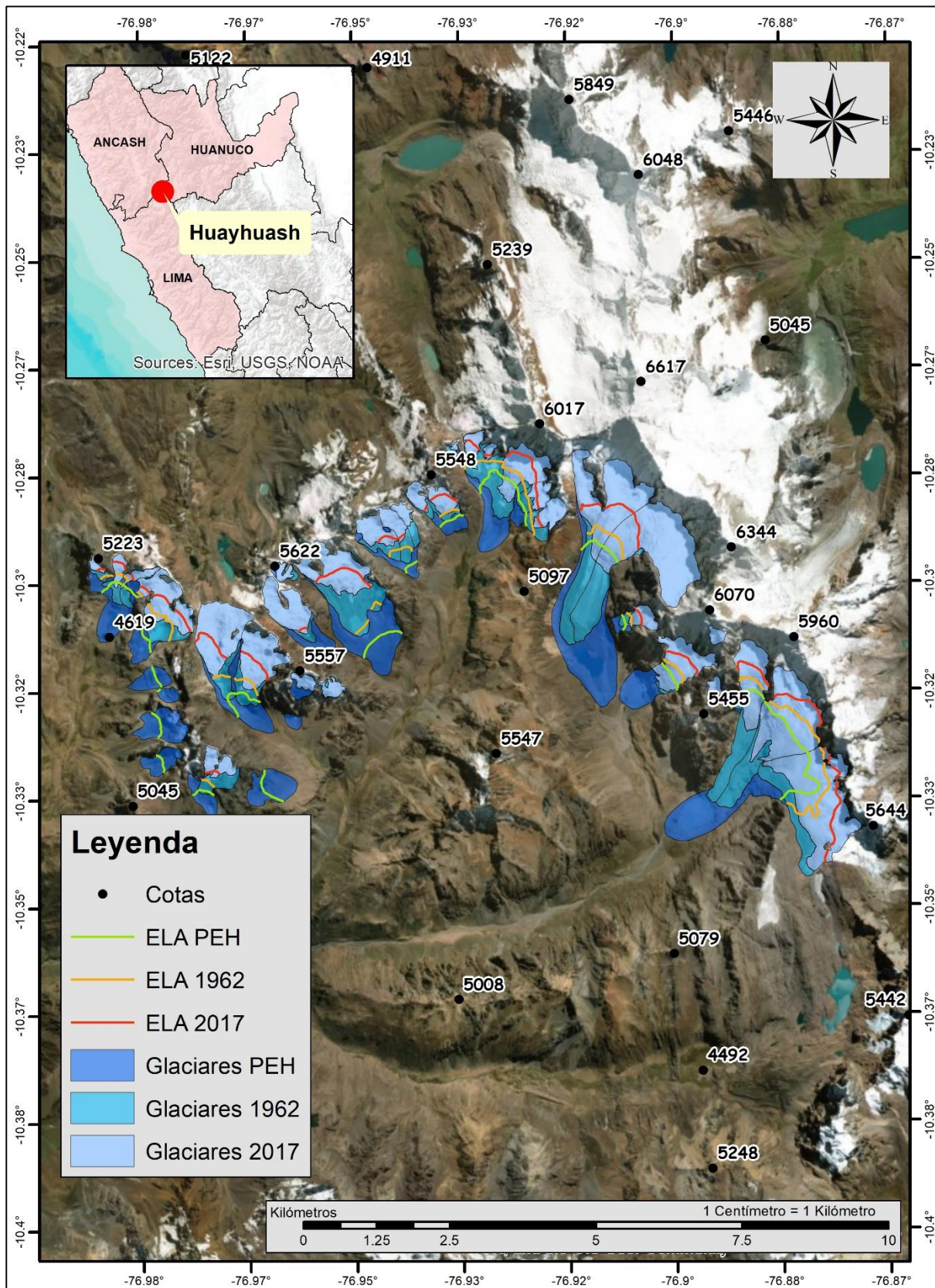


Figura 52. Variación de la ELA en el sector Rapay en los 3 periodos.

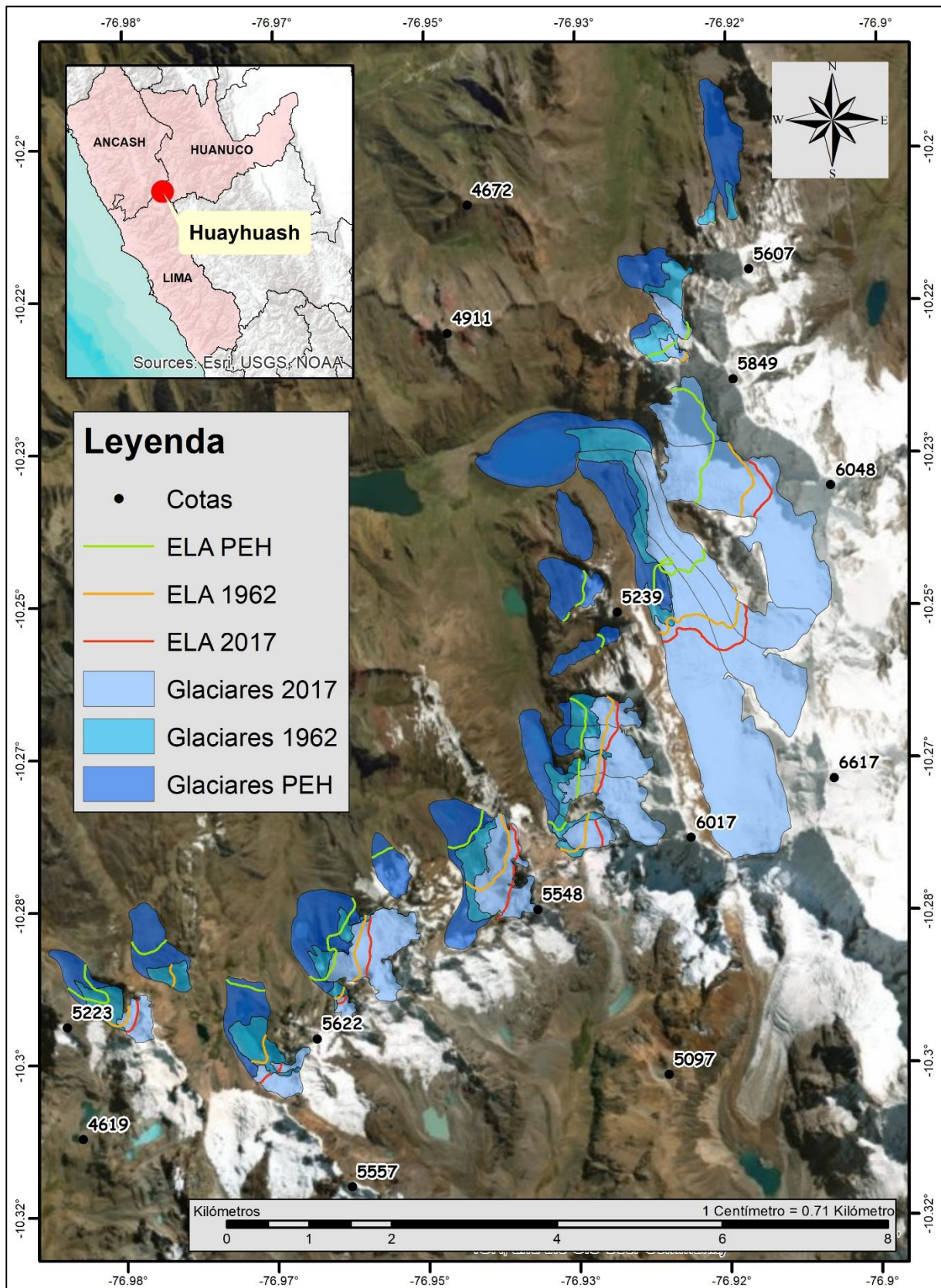


Figura 53. Variación de la ELA en el sector Achin en los 3 periodos.

#### 4.4. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100.

El análisis de regresión cuadrática puede usarse para hacer estimaciones y predicciones de valores de la variable dependiente (ELA) a partir de valores de la variable independiente (año). De los datos obtenidos de la ELA para la PEH, 1962 Y 2017 se obtuvo lo siguiente:

Tabla 25

Tabla desarrollada de distribución de datos para la estimación de la ELA

Nº	x (Año)	y (ELA)	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x <sup>4</sup>	x.y	x <sup>2</sup> y	y <sup>2</sup>
1	1850	5004	3422500	6331625000	11,713,506,250,000	9257400	17126190000	25040016
2	1962	5112	3849444	7552609128	14,818,219,109,136	10029744	19678357728	26132544
3	2017	5209	4068289	8205738913	16,550,975,387,521	10506553	21191717401	27133681
Σ	5,829	15,325	11,340,233	22,089,973,041	43,082,700,746,657	29,793,697	57,996,265,129	78,306,241

A partir de la Tabla 25 calculamos los parámetros a, b y c para el ajuste del modelo desarrollando las siguientes ecuaciones:

$$b = \frac{\left| \sum x - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} \right| \cdot \left| \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right| - \left| \sum x^2 y - \frac{\sum x^2 \cdot \sum y}{n} \right| \cdot \left| \sum x^3 - \frac{\sum x^2 \cdot \sum x}{n} \right|}{\left| \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right| \cdot \left| \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right| - \left| \sum x^3 - \frac{\sum x^2 \cdot \sum x}{n} \right|^2} = -17.28196983$$

$$a = \frac{\left| \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right| \cdot \left| \sum x^2 y - \frac{\sum x^2 \cdot \sum y}{n} \right| - \left| \sum x^3 - \frac{\sum x^2 \cdot \sum x}{n} \right| \cdot \left| \sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} \right|}{\left| \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right| \cdot \left| \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right| - \left| \sum x^3 - \frac{\sum x^2 \cdot \sum x}{n} \right|^2} = 0.004786531$$

$$c = \frac{\sum y - b \cdot \sum x - a \cdot \sum x^2}{n} = 20593.7424$$

Mientras que el coeficiente de determinación es:

$$r^2 = \frac{b \cdot \left| \sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} \right| + c \cdot \left| \sum x^2 y - \frac{\sum x^2 \cdot \sum y}{n} \right|}{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}} = 1.00$$

Hallados los valores de los parámetros a, b y c de la ecuación

( $y = ax^2 + bx + c$ ) y el valor del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) igual a “1”, se deduce que el ajuste lineal es perfecto, lo que significa que la variación total de la variable “y” es explicada por el modelo de regresión.

Hallados los parámetros a, b y c estimamos la ecuación de la parábola:

$$y = 0.004786531(x)^2 - 17.28196983.(x) + 20593.7424$$

Finalmente, para determinar el comportamiento predictivo de la ELA para el año 2050 y 2100, los datos obtenidos son remplazados del modo siguiente:

$$ELA_{2050} = 0.004786531(2050)^2 - 17.28196983.(2050) + 20593.7424 = 5281$$

$$ELA_{2050} = 0.004786531(2050)^2 - 17.28196983.(2050) + 20593.7424 = 5410$$

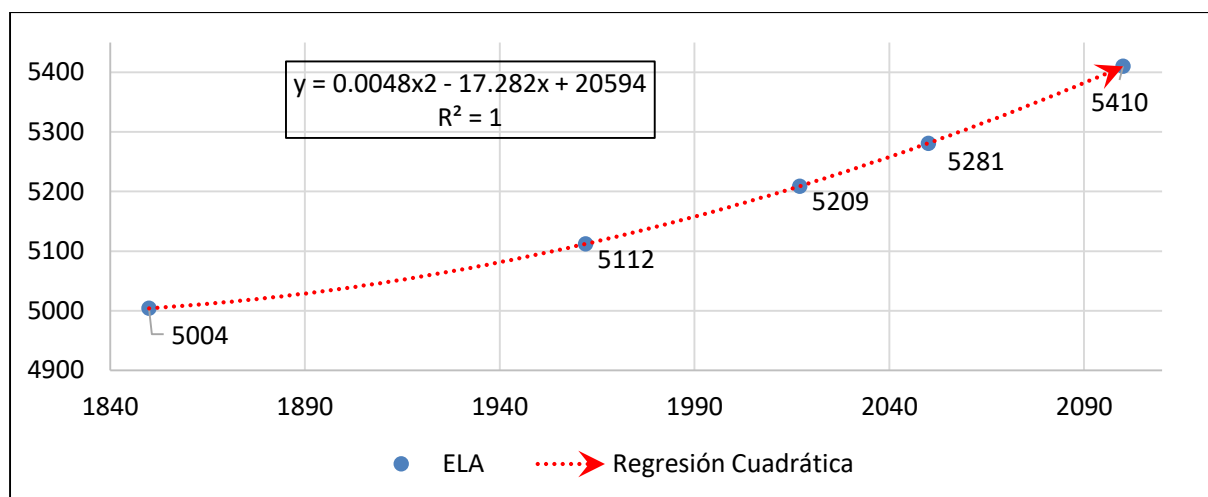


Figura 54. Comportamiento predictivo de la ELA para el 2050 y 2100.

#### 4.5. Estimación de la variación temperatura registradas por la evolución glaciar

La Tabla 26 muestra los resultados de la variación de la temperatura de la Cordillera Huayhuash por sector, en función a ELAs del año 2017, 1962 y PaleoELAs y del gradiente térmico vertical (GTV), es decir, se visualiza los resultados de aplicar la ecuación  $\Delta T = \text{GTV} \cdot \Delta \text{ELA}$  desarrollada por Úbeda (2011).

Tabla 26

Resumen de ELAs y paleo-ELAs y su variación de temperatura ( $\Delta T$ ).

Sector	ELA			PEH -1962		1962-2017		PEH -2017	
	PEH	1962	2017	$\Delta \text{ELA}$ (m)	$\Delta T$ (m)	$\Delta \text{ELA}$ (m)	$\Delta T$ (m)	$\Delta \text{ELA}$ (m)	$\Delta T$ (m)
Alto Marañón	5000	5166	5241	166	1.079	75	0.488	241	1.567
Rapay	5003	5066	5137	63	0.41	71	0.462	134	0.871
Achin	5004	5162	5209	158	1.027	47	0.306	205	1.333
Cordillera	5004	5112	5209	108	0.702	97	0.631	205	1.333

Nota:  $\Delta T = \text{GTV} \cdot \Delta \text{ELA}$ , ecuación propuesta por Úbeda (2011);  $\text{GTV} = 0.0065 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ .

Los resultados indican una variación de la temperatura de  $0.702 \text{ } ^\circ\text{C}$  desde la PEH al año 1962, desde el año 1962 al 2017 de  $0.631 \text{ } ^\circ\text{C}$ , siendo  $1.3325 \text{ } ^\circ\text{C}$  la variación de temperatura desde la PEH hasta el año 2017, en los glaciares de la cordillera Huayhuash.

## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Discusión

A lo largo de los Andes Peruanos donde se han realizado el inventariado de glaciares y/o estudios de evolución glaciár, se ha observado variaciones en desnivel de la ELA, el número, superficie y volumen glaciár que posiblemente estén vinculados al incremento de la temperatura, es decir al calentamiento global que causa el cambio climático actual.

Los glaciares de la cordillera Huayhuash no son la excepción, por ende, se discutirán a continuación las estimaciones halladas en el presente trabajo sobre las variaciones de la superficie y volumen glaciár, el desnivel de la ELA los glaciares, así como la variación de temperatura registrado en la geomorfología y evolución de los glaciares desde la PEH al año 2017. Además, se realizará un análisis de los resultados obtenidos con los de otros estudios.

#### 5.1.1. Variación de la superficie glaciár.

##### *Análisis comparativo de los resultados del ANA e INAIGEM con los obtenidos.*

La extensión de los glaciares actuales y pasados obtenidos en este trabajo para la cordillera Huayhuash, resulta sustancialmente distinto a los obtenidos por entidades públicas peruanas, encargados de los estudios técnicos y la gestión de glaciares en el Perú, como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) o el instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).

La estimación del área y volumen glaciár y paleoglaciár, el cálculo de la Altitud de la Línea de Equilibrio para distintos escenarios y la estimación de paleo temperaturas, derivan fundamentalmente de la de limitación cartográfica a detalle de la extensión de los glaciares y paleoglaciares.

En este apartado se discutirá las diferencias en la estimación del área glaciár en la cordillera Huayhuash, calculadas por las instituciones antes mencionadas y los resultados del



presente trabajo de investigación, sabiendo de la importancia de la geomorfología (mapeo detallado de glaciares), para el cálculo y estimación de otros parámetros físicos.

En este contexto, consideramos lo indicado en el Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas, realizada por el ANA en 19 cordilleras nevadas del Perú, donde se identificó 144 glaciares en la Cordillera Huayhuash con una superficie 53,27 km<sup>2</sup> al año 2007. En ese sentido, considerando la similitud de la metodología aplicada para la estimación en mención (uso de tecnologías geoespaciales de percepción remota, teledetección, y de Sistemas de Información Geográfica), es posible realizar el análisis comparativo de ambos resultados respecto a número y superficie glaciar.

Tabla 27

*Comparación con los resultados del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas del ANA, UGRH (2014)*

Año	Cantidad de glaciares en la Cordillera Huayhuash	Altitud Mínima (m.s.n.m.)	Altitud Máxima (m.s.n.m.)	Superficie glaciar cuenca Pativilca (sectores de Achin y Rapay)
2007	*144	*4303	*6617	* 53.27 km <sup>2</sup>
2017	82	4367	6157	22.247 km <sup>2</sup>
Diferencia (10 años)	-62	64	-460	13.383 km <sup>2</sup>

*Nota: (\*) Adaptado de ANA, UGRH (2014).*

Se observa que el contraste respecto a los valores de altitud, cantidad y superficie glaciar entre los resultados del ANA y los obtenidos en tan solo 10 años de diferencia es demasiado significativo.

En ese sentido, considero que estas notables diferencias podrían deberse entre otros, a ciertas incoherencias en las estimaciones realizadas por el ANA, respecto a la altitud de los glaciares. Según el ANA la altitud máxima alcanzada por un glaciar en la cordillera Huayhuash es de 6617 m.s.n.m., sin embargo, la cartografía geomorfológica realizada sobre las imágenes satelitales del año 2017 y 1962, muestran una altitud glaciar máxima de 6157 m.s.n.m., es decir 469 m por debajo de lo estimado por ANA.

Adicionalmente, el ANA estima una superficie glaciar de 53.27 km<sup>2</sup> en la cuenca Pativilca (conformado por las sub cuencas de Achin y Rapay, según el mapa de cuencas y

subcuencas del Perú (ANA), sin embargo, el resultado obtenido en el presente estudio asciende a 22.247 km<sup>2</sup>.

Siendo la superficie glaciaria un indicador de la disponibilidad de agua en glaciares, la considerable diferencia de 13.383 km<sup>2</sup> de los resultados generan perspectivas absolutamente contrarias, más si tenemos en cuenta que el agua proveniente de los glaciares de la Cuenca Pativilca alimentan a grandes ciudades como Barranca, Pativilca, Paramonga, Manas, Pacllón, entre otros.

Precisamos que el “volumen glaciario” es un indicador más exacto para estimaciones de disponibilidad de agua en glaciares, por lo que en el Capítulo 5.2, se realizara un análisis más detallado del mismo.

En el Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña del INAIGEM (2018), se detalla el Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas por subcuencas del Perú, para lo cual INAIGEM aplicó técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica programadas en Python. Considerando la metodología aplicada, realizamos un análisis comparativo de los resultados obtenidos:

Tabla 28

*Comparación con los resultados del Inventario de glaciares del INAIGEM (2018).*

	Cantidad de glaciares	Área glaciario en 1962 (km <sup>2</sup> )	Área glaciario en 2016/2017 (km <sup>2</sup> )	Pérdida de la superficie glaciario (km <sup>2</sup> )	Reducción de la superficie glaciario (%)	Tasa de desglaciación (km <sup>2</sup> /año)
INAIGEM (2018)	96	86.890	53.060	33.830	38.930	0.640
TESIS	82	45.250	34.464	10.786	23.836	0.196
Diferencia	-14	-41.641	-18.596	-23.045	-15.094	-0.444

Al igual que con los resultados obtenidos por el ANA, las diferencias entre las estimaciones de INAIGEM son significativamente diferenciadas.

Si bien la metodología aplicada tanto por el ANA, el INAIGEM y el presente estudio se basan en tecnologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica, las estimaciones del ANA e INAIGEM no contemplan los límites geomorfológicos notablemente

marcados tanto en el circo de los glaciares como en sus morrenas frontales, es decir, el cartografiado es demasiado generalizado, por lo que es posible se haya considerado zonas blancas de la cordillera que no necesariamente son cuerpos de hielo (glaciares) incrementado los valores en la estimación del superficie glaciar.

Por ejemplo, si comparamos los resultados del ANA con los de INAGEM, para el año 2007, indica el ANA existían 144 glaciares y, para el 2018 según INAGEM existen 96, es improbable que en 11 años se hayan extinguido 48 glaciares, esta diferencia se justificaría si tomamos en cuenta que el ANA utiliza las escalas oficiales de 1:50.000 y 1:100.000, mientras que INAGEM usa la escala de 1:25,000 a fin de lograr un mayor detalle en la individualización de glaciares, mientras más individualizada la cartografía mejor calidad de resultados se obtendrá.

Por ende, los resultados más acertados serían los obtenidos en el presente trabajo de investigación, ya que realiza una identificación profunda e individualizada de los aspectos geomorfológicos de cada uno de los glaciares.

### *Análisis comparativo de los resultados obtenidos con estudios a fines*

Los estudios realizados en los Andes Peruanos, considerando a la PEH como inicio referencial, muestran las siguientes estimaciones de pérdida de superficie glaciar:

Tabla 29

#### *Comparación de la superficie glaciar con otros estudios a fines.*

	Cordillera Blanca			Cordillera Huayhuash		Nevado Sulcón	NO de la cordillera Pariacaca	Cordillera Pariacaca	Cordillera Vilcabamba
	Glaciar Parón	Cuenca Ranrahirca	Vertiente SO del Nevado Hualcán	Huayhuash	Vertiente SO del Nevado Yerupajá				
Año	2016	2016	2016	2017	2016	2010	2016	2010	2017
Área Actual (km <sup>2</sup> )	17.66	24.47	18.555	34.464	6.19	11.05	2	3.13	17.81
Área PEH (km <sup>2</sup> )	30.89	45.85	29.737	65.286	13.95	45.81	4.1	21.27	37.94
$\Delta$ PEH-Actual	13.23	21.38	11.182	30.822	7.76	34.76	2.1	18.14	20.13
% Actual	57.17%	53.37%	62.40%	52.79%	44.37%	24.12%	48.78%	14.72%	47%
% Perdido	42.83%	46.63%	37.60%	47.21%	55.63%	75.88%	51.22%	85.28%	53%
Autor	Concha et. al, 2018	Iparraguirre et. al, 2018	Giráldez 2011	Investigación actual	Inocente & Gonzales, 2017	Vásquez 2015	Vásquez et. al, 2018	Quirós 2013	Concha et. al, 2017

Nota: SO = Suroeste; NO = Noroeste.

Como se puede observar los estudios difieren en cuanto a su ubicación, extensión, el año de la imagen satelital sobre la que fueron cartografiadas, el tipo de sistema glaciar y la morfología en general. Además, considerando la particularidad de cada una de las zonas por sus los factores climáticos (precipitación, vientos, radiación solar, etc.), sería poco acertado hacer conclusiones específicas respecto a la comparación de sus estimaciones de pérdida de superficie glaciar con las de la cordillera Huayhuash.

Sin embargo, todas coinciden en la pérdida significativa de la proporción de superficie glaciar, siendo la cordillera Pariacaca (85.28%) y el Nevado Sulcón (75.88%) las más afectada.

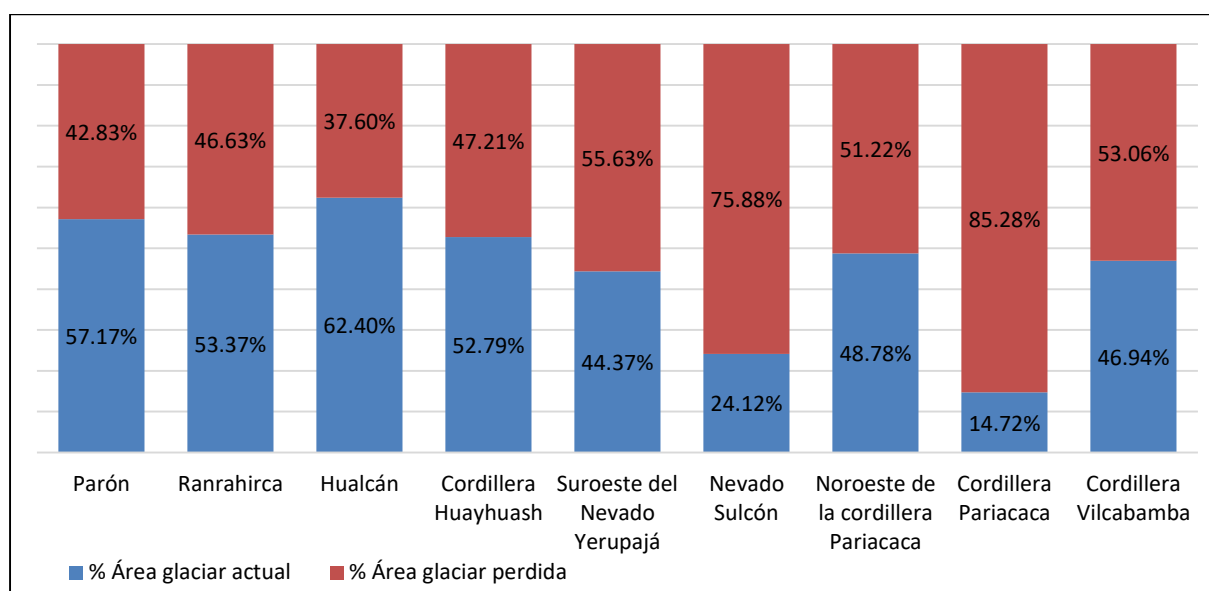


Figura 55. Comparación de las proporciones del área glaciar perdida con respecto a su área en la PEH.

### ***Análisis comparativo de la superficie glaciar por periodo y sector.***

Desde la PEH a 1962, la Cordillera Huayhuash perdió el 30.69% de su superficie glaciar y desde el año 1962 al 2017 el 16.52% con respecto a la PEH, se hace evidente de este comparativo que la cordillera Huayhuash ha perdido en los últimos 55 años (1962 – 2017) más de la mitad de lo que perdió en los 112 años (PEH a 1962).

Las diferencias son más acentuadas si realizamos el mismo análisis por sector: Alto Maraón perdió el 30.02% de su superficie glaciar y desde el año 1962 al 2017 el 15.91% con respecto a la PEH, Rapay perdió el 28.09% de su superficie glaciar y desde el año 1962 al 2017 el 19.62% con respecto a la PEH, Achin perdió el 31.03% de su superficie glaciar y desde el

año 1962 al 2017 el 13.16% con respecto a la PEH. Este comparativo evidencia la dinámica glaciaria diferenciada en cada sector a lo largo de los periodos, siendo, más significativa en los últimos 55 años.

Tabla 30

*Pérdida de la superficie glaciaria con respecto a la PEH*

Sector	Área Glaciaria (km <sup>2</sup> )			PEH - 1962 (112 años)		1962 - 2017 (55 años)		PEH - 2017 (167 años)	
	PEH	1962	2017	Δ Área (km <sup>2</sup> )	Perdida respecto a la PEH	Δ Área (km <sup>2</sup> )	Perdida respecto a la PEH	Δ Área (km <sup>2</sup> )	Perdida respecto a la PEH
Alto Marañón	23.925	16.024	12.217	7.901	33.02%	3.807	15.91%	11.708	48.94%
Rapay	23.772	17.094	12.429	6.678	28.09%	4.665	19.62%	11.343	47.72%
Achin	17.589	12.132	9.818	5.457	31.03%	2.315	13.16%	7.772	44.19%
Cordillera	65.286	45.25	34.464	20.037	30.69%	10.786	16.52%	30.823	47.21%

Considerando la superficie glaciaria de los sectores al 2017, es Achin el más vulnerable de la cordillera Huayhuash con 9.817 km<sup>2</sup> de área glaciaria, comparado con los 12.429 km<sup>2</sup> de Rapay y los 12.217 km<sup>2</sup> del sector Alto Marañón. Además, es el sector que presenta menor número de glaciares (17) y el menos representativo de la Cordillera a lo largo de los periodos (28% en el 2017), es decir, si tuviéramos que hacer una afirmación acerca del sector con menor reserva glaciaria basada en este indicador sería sin duda el Sector Achin, sin embargo, como se observara más adelante, si realizamos el mismo análisis teniendo como indicador el volumen glaciario es Rapay el sector con menor reserva glaciaria.

### 5.1.2. Variación del volumen glaciario.

El macizo de la Cordillera Huayhuash forma parte de la Zona Reservada Cordillera Huayhuash (ZRCH) y abarca parte de los territorios de las provincias de Bolognesi (Ancash), Lauricocha (Huánuco) y Cajatambo (Lima).

Además, según el SERNANP, posee 21 nevados con glaciares que dan origen a 46 lagunas, siendo su vertiente occidental el inicio de los ríos Pativilca y Huaura, tributarios de la cuenca del Pacífico, y ríos de la vertiente oriental como el Marañón. No cabe duda de que representan una parte importante de las reservas hídricas disponibles para la población de la

costa peruana (principalmente las ciudades de Barranca y Paramonga) y sus actividades económicas.

En ese sentido, en el punto 5.1.1 dimos cuenta de las investigaciones realizadas por las principales instituciones competentes, sin embargo, observamos que las investigaciones en mención se realizan estimaciones de número y superficie glaciar, acertados indicadores de la evolución de los glaciares y el registro glaciar del cambio climático, pero menos precisos para hacer estimaciones de las dimensiones exactas de un cuerpo de hielo, al ser la superficie una magnitud bidimensional que solo considera el alto y el ancho de un cuerpo, mientras que el volumen es tridimensional porque considera además del alto y ancho la profundidad de este.

Siendo entonces, el volumen glaciar el indicador más preciso para estimar la cantidad de agua en reserva de los glaciares, podemos hacer previsiones más acertadas de la disponibilidad hídrica, a fin de conocer escenarios futuros con concepciones más realistas de posibles sequías, pérdida de recursos biológicos, seguridad alimentaria, cambio climático, entre otros.

Sin embargo, una limitante son los escasos los estudios en cuanto al desarrollo de metodologías para realizar estimaciones de volumen glaciar, por lo que el presente trabajo de investigación, además de sus objetivos planteados, pretende contribuir a los estudios metodológicos no solo para estimaciones de volumen de glaciares actuales (2017), sino también de reconstrucción de volúmenes de glaciares del pasado (1992, PEH).

En líneas sucesivas, se realizará un análisis comparativo de los resultados obtenidos con otros estudios a fines en los Andes Peruanos, de las estimaciones halladas del volumen glaciar por periodo y sector de la Cordillera y de la superficie y volumen glaciar como indicadores de la reserva de agua en los glaciares.

### *Análisis comparativo de los resultados obtenidos con estudios a fines*

Como se detalla en líneas precedente, la estimación de los espesores del hielo actual se hizo en función al modelamiento de la topografía subglaciar aplicando la metodología GLABTOP y complementada con la herramienta GLARE, que consiste en reconstruir los paleoglaciares de 1962 y de la PEH a través de imágenes satelitales y morrenas dejadas por los glaciares.

En ese sentido, los estudios más recientes realizados en los Andes Peruanos que aplicaron la misma metodología, considerando a la PEH como inicio referencial, muestran las siguientes estimaciones de pérdida del volumen glaciar.

Tabla 31

#### *Comparación de los resultados de pérdida del volumen glaciar con estudios afines*

Área y año de estudio	Volumen (Mm <sup>3</sup> )			PEH - 1962		1962 - 2017		PEH-2017	
	PEH	1962	Presente (2016-2017)	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	(%)
Parón (2016)	1054.500	773.800	639.300	280.700	26.62%	134.500	17.38%	415.200	39.37%
Ranrahirca (2016)	2615.000	1255.000	868.000	1360.000	52.01%	387.000	30.84%	1747.000	66.81%
Huayhuash (2017)	4898.731	2731.087	1207.643	2167.644	44.25%	1523.445	55.78%	3691.089	75.35%
Pariacaca (2016)	242.924	187.689	119.424	55.235	22.74%	68.265	36.37%	123.500	50.84%

Como se puede observar estos estudios también difieren en cuanto a su ubicación, extensión, el tipo de sistema glaciar y la morfología en general, es decir, también sería poco acertado hacer conclusiones específicas respecto a la comparación de sus estimaciones de pérdida de volumen glaciar con las de la cordillera Huayhuash, sin embargo, es evidente la pérdida significativa de la proporción del volumen glaciar respecto a la PEH, siendo cordillera Huayhuash la más afectada (75.35 %).



Figura 56. Distribución de trabajos afines en reconstrucción volumétrica.

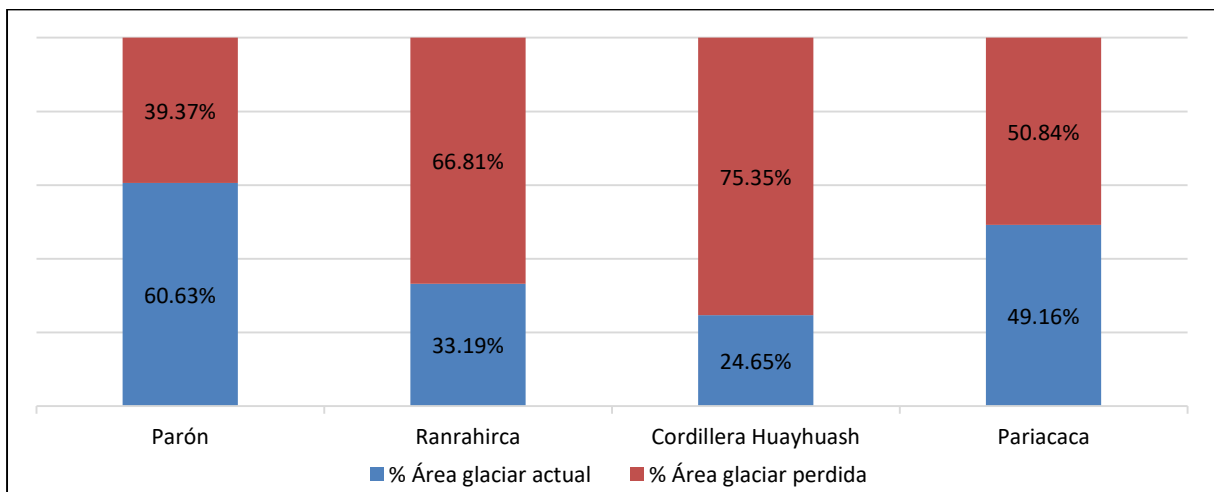


Figura 57. Comparación de las proporciones del volumen glaciar perdido con respecto a su volumen en la PEH.



### ***Comparativo del volumen glaciar por periodo y sector.***

Los resultados evidencian una pérdida acelerada de las proporciones de masa glaciar, siendo desde la PEH a 1962 el 44.25% de su volumen glaciar y desde el año 1962 al 2017 el 31.10% con respecto a la PEH, lo cual denota que en los últimos 55 años (1962 – 2017) la pérdida del volumen glaciar de la cordillera Huayhuash se incrementó en más del 70% de lo que perdió en 112 años (PEH a 1962).

Tabla 32

#### ***Pérdida del volumen glaciar con respecto a la PEH.***

Sector	Volumen Glaciar (Mm <sup>3</sup> )			PEH -1962 (112 años)		1962 - 2017 (55 años)		PEH - 2017 (167 años)	
	PEH	1962	2017	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Perdida respecto a la PEH	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Perdida respecto a la PEH	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Perdida respecto a la PEH
Alto Marañón	1,540.87	780.302	403.021	760.563	49.36%	377.281	24.49%	1,137.84	73.84%
Rapay	1,972.14	1,187.28	375.86	784.856	39.80%	811.419	41.14%	1,596.28	80.94%
Achin	1,385.73	763.507	428.762	622.225	44.90%	334.745	24.16%	956.97	69.06%
Cordillera	4,898.73	2,731.09	1,207.64	2,167.64	44.25%	1,523.45	31.10%	3,691.09	75.35%

Como se observa, las diferencias son más acentuadas si realizamos el mismo análisis por sector, es decir, en 55 años el volumen glaciar que perdió cada sector en la Cordillera Huayhuash se incrementó en más del 50%, 103% y 54% para Alto Marañón, Rapay y Achin respectivamente, de lo que perdió en 112 años (PEH a 1962).

Los resultados además nos muestran la dinámica glaciar diferenciada de cada sector de la Cordillera a lo largo de los periodos, lo que denota la desigual disponibilidad de volumen de agua para las ciudades más cercanas como Pacllón, Huayllapa, Barranca, Pativilca, Queropalca, entre otros que forman parte de la Cuenca y Subcuencas de la Cordillera; considerando que una parte significativa del agua que las alimenta proviene del derretimiento de los glaciares de la Cordillera Huayhuash.

En este sentido, al ser Rapay la Sub Cuenca con menor volumen glaciar, se deduce que las ciudades más cercanas con menor volumen de agua disponible en reserva glaciar serían, entre otras que la conforman, Uramasa y Huayllapa.

A efectos de tener una idea más perceptible realizamos un análisis hipotético; considerando que una persona debería consumir al día 100 litros de agua para atender todas sus necesidades (OMS, 2003), los 1,086,878,385,108.00 litros de agua presentes en la Cordillera por cuanto tiempo lograrían abastecer a la población de las regiones a las que sus aguas alimentan o la población peruana.

Tabla 33

*Estimación de la duración de la reserva de agua de la cordillera Huayhuash*

	Población CENSO 2017 (INEI)	Consumo en Litros/año	Reserva de agua Cordillera (litros)		Tiempo de reserva (aproximadamente)	
			2017	1962	2017	1962
Dep. Lima	9,485,405					
Dep. Ancash	1,083,519	412,083,941,500	1,086,878,385,108	2,731,087,271,160	2 años 7 meses	6 años 7 meses
Dep. Huánuco	721,047					
Perú	31,237,385	1,140,164,552,500			1 año	2 años 5 meses

La conjetura planteada en la Tabla 33, denota que toda el agua presente en los glaciares de la cordillera Huayhuash podría abastecer a la población de los departamentos de Lima, Ancash y Huánuco por aproximadamente 2 años y 7 meses y a la población del Perú por aproximadamente 1 año.

Sin embargo, si tuviéramos en la actualidad (2017) el mismo volumen glaciar que en el año 1962 (2,731,087,271,160 litros), la Cordillera Huayhuash podría abastecer a la población de los departamentos de Lima, Ancash y Huánuco por aproximadamente 6 años y 7 meses y a la población del Perú por aproximadamente 2 años con 5 meses. Obviamente este análisis no considera los otros usos que le damos las personas al agua (uso industrial, agrícola, etc.), tampoco el ciclo hidrológico, fuentes de agua, etc. es solo un caso hipotético a fin de reforzar el entendimiento de la magnitud de agua presente en los glaciares de la Cordillera.

***Comparativo de la variación de la superficie y volumen glaciar.***

Como mencionamos, la superficie glaciar es un indicador eficiente de la evolución de los glaciares y el registro glaciar del cambio climático al momento de hacer análisis para

diferentes periodos, sin embargo, el indicador más preciso para tener estimaciones más acertadas de las reservas glaciares es el volumen glaciar.

Esta deducción se fundamenta en la premisa de que la superficie glaciar refleja los límites del glaciar de forma bidimensional, por lo que solo considera el alto y el ancho de un cuerpo de hielo, mientras que el volumen es tridimensional porque considera además del alto y ancho, la profundidad de éste.

En este sentido, en la siguiente tabla se compara los resultados obtenidos de ambos indicadores, a fin de realizar un análisis comparativo de los mismos. La tabla muestra de color “anaranjado” la mayor variación de superficie y volumen glaciar y de color “amarillo” la menor variación.

Tabla 34

*Comparación de la variación de la superficie y volumen glaciar.*

Sector	PEH-1962 (112 años)		1962-2017 (55 años)		PEH-2017 (167 años)	
	$\Delta$ Área (km <sup>2</sup> )	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	$\Delta$ Área (km <sup>2</sup> )	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )	$\Delta$ Área (km <sup>2</sup> )	$\Delta$ Volumen (Mm <sup>3</sup> )
Alto Marañón	7.901	760.563	3.807	377.281	11.708	1,137.844
Rapay	6.678	784.856	4.665	811.419	11.343	1,596.275
Achin	5.457	622.225	2.315	334.745	7.772	956.970

Como denota la Tabla 34, Alto Marañón es al parecer el sector que perdió mayor cantidad de masa de hielo desde la PEH si consideramos la superficie glaciar ( $\Delta$  11.708 km<sup>2</sup>), sin embargo, considerando el volumen glaciar es Rapay ( $\Delta$  1,596.275 Mm<sup>3</sup>), lo cual evidencia que las estimaciones de superficie no necesariamente reflejan la dimensión real de los glaciares, estas diferencias se deben estrictamente a las condiciones geográficas propias de cada sector y específicamente de la forma y profundidad de cada uno de los glaciares.

Lo anterior denotaría conclusiones diferenciadas en cuanto a las estimaciones de reserva glaciar de la Cordillera, modificando las perspectivas y previsiones que se podrían generar al respecto, por ende, hacemos hincapié en la importancia de realizar estudios que apliquen

metodologías que permitan hacer estimaciones de volumen, por cuanto es el indicador que con mayor precisión reflejará la cantidad de agua presente en las reservas glaciares.

### **5.1.3. Variación de la ELA en la cordillera Huayhuash**

De acuerdo con Huddart y Stott (2010), el estado de salud de un glaciar se puede conocer a través de su balance de masa que reflejo el incremento, reducción o el estado de equilibrio de un glaciar. La línea conceptual que separa la zona de incremento de la zona de reducción o ablación de un glaciar se denomina línea de equilibrio, y la altitud a la que se encuentre esta línea se le denomina Equilibrium Line Altitude (ELA).

Considerando que la supervivencia de un glaciar en el tiempo se encuentra en función de la acumulación y la ablación, si los procesos de acumulación predominan sobre la ablación, la ganancia de masa se verá favorecida y por lo tanto también la expansión glaciar, provocando que la ELA se mueva pendiente abajo. Lo opuesto ocurre si los procesos de ablación predominan sobre la acumulación, en cuyo caso la ELA se moverá pendiente arriba, condenado a los glaciares a desaparecer.

Los factores que influyen en la variación del balance de masa pueden ser 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.

En ese sentido, en líneas sucesivas se realizará un análisis comparativo de los valores de ELA glaciar para los periodos PEH, 19962 y 2017, se grafica la línea conceptual por debajo de la cual los glaciares de la Cordillera estarían condenados a desaparecer y se analiza la variación del parámetro ELA considerando a la temperatura como factor climático principal, con la finalidad de conocer el estado y evolución de los glaciares de la Cordillera Huayhuash.

Así mismo, se realizó un análisis comparativo de la variación de los valores de ELA con la de otros estudios a fines en los Andes Peruanos.

***Análisis comparativo de los valores de ELA glaciario por periodo y sector.***

Tabla 35

*Comparación del ascenso de la ELA en los periodos PEH-1962 y 1962-2017*

Sector	ELA (m)			$\Delta$ ELA (m)		% Ascenso
	PEH	1962	2017	PEH - 1962 (112 años)	1962 - 2017 (55 años)	
Alto Maraón	5000	5166	5241	166	75	45%
Rapay	5003	5066	5137	63	71	113%
Achin	5004	5162	5209	158	47	30%
Cordillera	5004	5112	5209	108	97	90%

En la Tabla 35, al igual que los valores estimados para superficie y volumen, se hace evidente la variación del estado de los glaciares en los últimos 55 años (1962-2017), siendo que la ELA ha experimentado un ascenso del 90% con respecto a los primeros 112 años (PEH-1962).

En este sentido, el ascenso de la ELA indica que los glaciares de la Cordillera Huayhuash están reduciendo su zona de acumulación y que el proceso de abrasión está afectando la salud de sus glaciares de manera vertiginosa. Estimando que en el año 1962 los glaciares mostraban condiciones favorables (ganancia de masa) por encima de los 5112 m.s.n.m., en la actualidad (2017) es a 5209 m.s.n.m. la altitud en la que se dan estas condiciones.

Así mismo, considerando que en la PEH el punto de equilibrio (ELA) de los glaciares se encontraba a 5004 m.s.n.m., es decir 205 m más abajo que la actualidad (2017), damos cuenta de las diferencias extremas de ambos escenarios.

En cuanto a las variaciones de ELA por sector de la Cordillera, la Figura 58 denota una variación mínima, lo cual obedece a las condiciones climáticas extremadamente favorables que predominaban en la PEH, considerando que fue en este periodo la máxima expansión de los glaciares.

Sin embargo, en los periodos 1962 y 2017 existe una notable variación entre los valores de ELAs estimados de cada sector, lo que se podría atribuir entre otros a las condiciones

geográficas, la posición que ocupan respecto al viento, factores climáticos, factores mecánicos y condiciones locales.

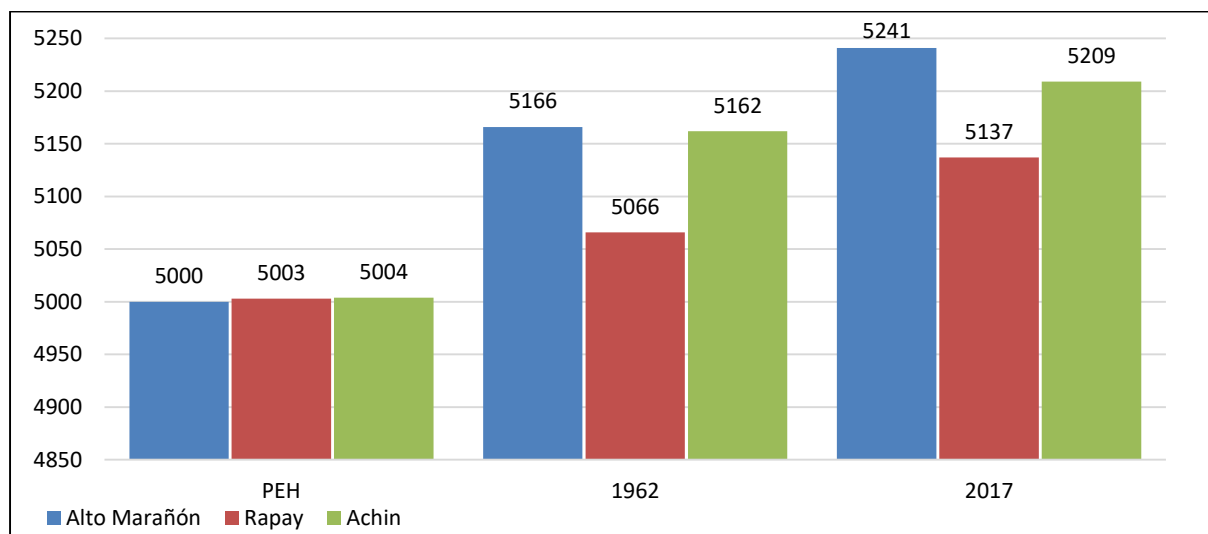


Figura 58. ELAs de los sectores de la cordillera Huayhuash por periodos.

### **Relación de tendencias de ELA y volumen glaciar.**

La tendencia de los resultados de volumen glaciar y las ELAs, son indirectamente proporcionales, es decir, mientras el volumen glaciar la cordillera siga disminuyendo, el parámetro ELA ascenderá.

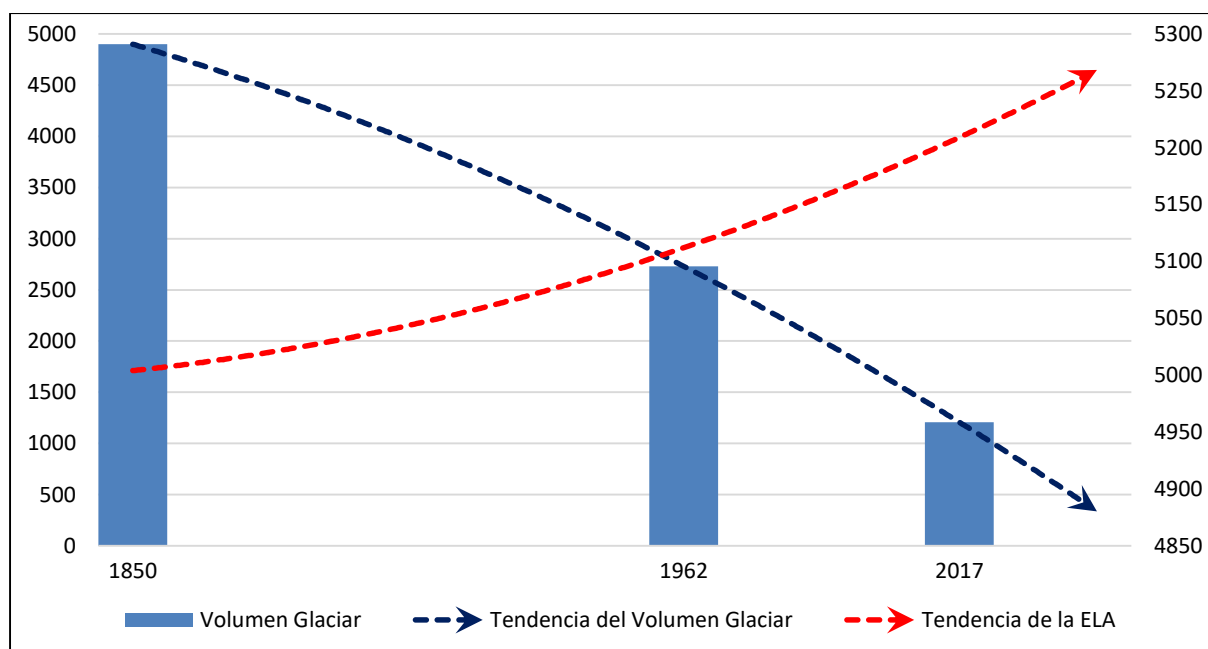


Figura 59. Relación de la tendencia de la ELA con el Volumen Glaciar

### ***Análisis de las cotas mínimas y máximas por periodo.***

Una cota mínima es un punto que indica la altura mínima en la que es posible encontrar masa glaciar, en este contexto, la menor altitud (cota mínima) para encontrar un glaciar correspondía al sector Achin ubicándose a 4,163.34 m.s.n.m. en la PEH. En 1962 había que ir hasta los 4,164.01 m.s.n.m. para poder visualizar masa glaciar y, en el 2017 es necesario llegar a los 4,367.87 m.s.n.m.

En tanto, la cota máxima nos indica la altura máxima alcanzada por un glaciar, siendo el valor obtenido de la cartografía geomorfología del área de estudio 6,156.46 m.s.n.m. Este valor es el mismo para los tres periodos debido a que nuestra metodología para la delimitación de los glaciares de PEH y 1962 utilizó como base la identificación geomorfológica de la cartografía del 2017. Además, es sabido que el desarrollo de un glaciar se da pendiente abajo, formándose lenguas glaciares de existir las condiciones favorables.

Tabla 36

#### *Cotas máximas y mínimas según periodo*

Año	Cota Máxima		Cota Mínima	
	Glaciar	m.s.n.m.	Glaciar	m.s.n.m.
2017	Achin17_11	6,156.46	Achin17_13	4,367.87
1962	Achin62_11	6,156.46	Achin62_13	4,164 .01
PEH	AchinPEH_14	6,156.46	AchinPEH_16	4,163.34

Del análisis de las cotas mínimas se evidencia que la altitud en la que se encontraban los glaciares de la Cordillera se ha elevado significativamente, ubicándose los glaciares en las partes más altas y escarpadas de los nevados, lo cual nos hace deducir que los glaciares no se están desarrollando, es decir, al no ganar masa glaciar están retrocediendo.

### ***Análisis de la isolínea glaciar (ELA)***

Como mencionamos en párrafos precedentes, las ELAs son isolíneas que dividen al glaciar en dos zonas (zona de acumulación y zona de ablación), los glaciares que se encuentren

por debajo de esta línea estarían condenados a desaparecer en el tiempo de continuar las condiciones climáticas.

Tabla 37

*Glaciares condenados a desaparecer en cada periodo por encontrarse debajo de la ELA*

2017		1962		PEH	
Glaciar	Cota Mayor (ELA 5004m)	Glaciar 1962	Cota Mayor (ELA 5112m)	Glaciar PEH	Cota Mayor (ELA 5209m)
AltoM17_02	5,144	Achin62_17	5,018	RapayPEH_16	4,826
AltoM17_09	5,206	Achin62_18	4,935	AchinPEH_13	4,961
AltoM17_11	5,204	Achin62_19	4878	AchinPEH_21	4,935
Rapay17_32	5,201			AchinPEH_22	4,878
Achin17_15	5,113				
Achin17_16	5,196				
Achin17_17	5,018				

En ese sentido, se puede apreciar que en el año 1962 fueron 3 los glaciares de la cordillera Huayhuash ubicados debajo de esta línea, de los cuales en la actualidad no existen “Achin62\_18” y “Achin62\_19”, es decir tomo menos de 55 años que estos se extinguieran. En cuanto al tercer glaciar (Achin62\_17) al año 2017 redujo su área glaciar en 0.144 km<sup>2</sup> (56.2 %) y su volumen en 7.337 Mm<sup>3</sup> (80.9 %) por lo que es posible se extinga dentro de poco de persistir las mismas condiciones climáticas.

En la actualidad (2017) siete de los glaciares de la cordillera Huayhuash se encuentran por debajo de esta línea, considerando las vertiginosas variaciones que vienen experimentando los glaciares respecto a su superficie, volumen y ELA, podrían estar extintos en menor tiempo que los glaciares de 1962.

Reforzamos el análisis anterior considerando lo señalado en el 5º Informe de Evaluación del IPCC (2013) que refiere que a nivel global son más de 600 los glaciares extintos en las últimas décadas, además, los glaciares que aún persisten han sufrido una disminución vertiginosa de su área y volumen.



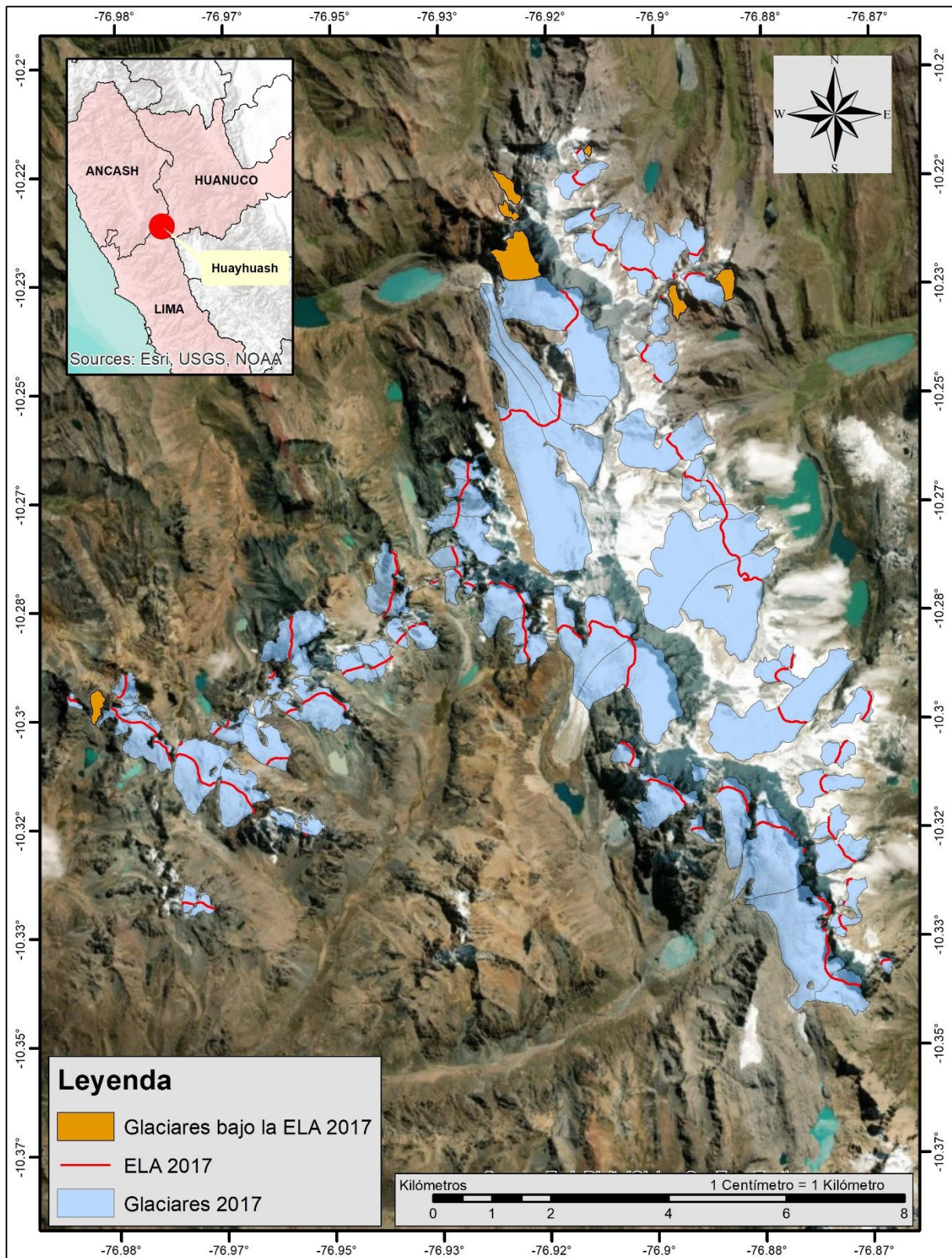


Figura 60. Glaciares condenados a desaparecer por estar por debajo de la ELA en el año 2017.

### ***Comparativo de resultados obtenidos con otros estudios***

El único estudio a fin en la Cordillera Huayhuash es el de Inocente & Gonzales (2017) realizado en la vertiente suroeste del nevado Yerupajá, los glaciares de esta vertiente forman

parte de los sectores de Achin y Rapay de la Cordillera. Ambos estudios realizan un análisis geomorfológico para cartografiar los glaciares y utilizan softwares similares para sus estimaciones.

Sin embargo, la diferencia radica en que para estimar la ELA utilizamos la herramienta ELA\_Calculation, basada en datos de entrada del volumen y cartografía glaciar, así como del Balance Ratio representativo de 1.92, obtenido del balance de masas en el monitoreo del glaciar Artesonraju para el año 2016 – 2017, mientras que para la vertiente suroeste del nevado Yerupajá se utiliza la hoja de cálculo de (Osmaston, 2005) basada en la Altitud y Área, ponderando los cálculos con diferentes valores de Balance Ratio que calculó de forma automática los promedios y las desviaciones típicas de cada serie ( $\sigma$ ) y seleccionando los valores vinculados con el menor valor de desviación típica por tratarse del resultado más probable de la ELA o la paleo-ELA.

El comparativo de las estimaciones de variación de ELA de glaciares de la PEH (paleoELA) y glaciares al 2017, se aprecian figura 61:

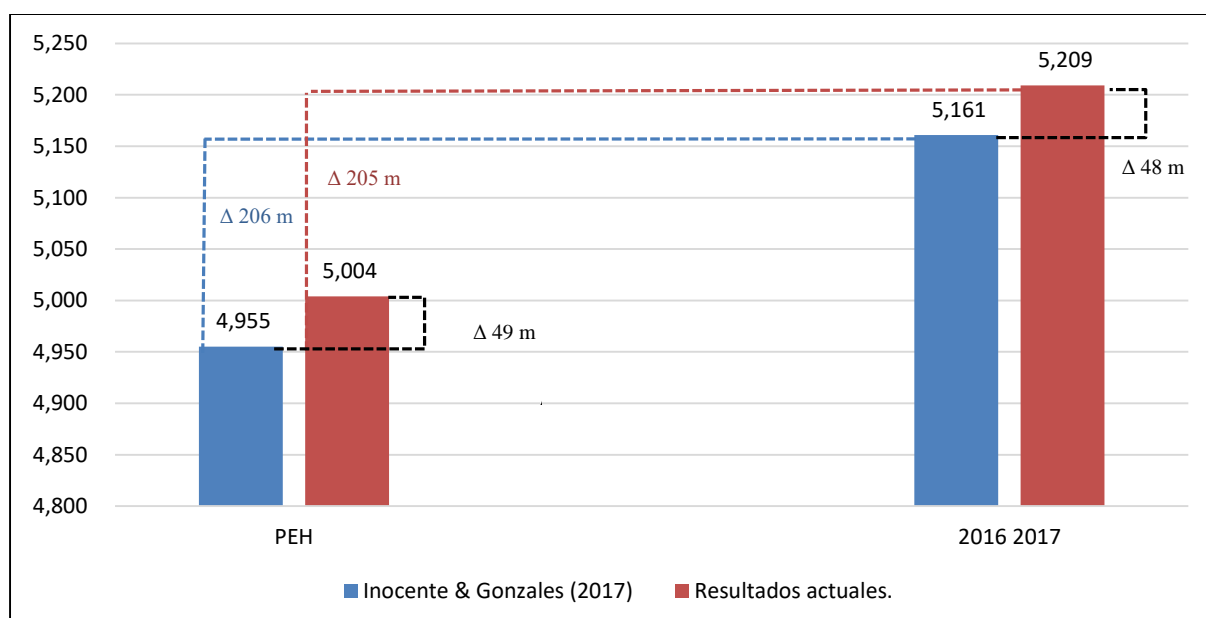


Figura 61. Resultados comparativos de la ELA con resultados de Inocente & Gonzales, (2017) en la cordillera Huayhuash.

Se denota de la figura 61, que en ambos estudios el valor del desnivel obtenido de la PEH al 2017 es afín, siendo 205 m el hallado en la cordillera Huayhuash y 206 m en la vertiente suroeste del nevado Yerupajá (Vertiente que forma parte de la Cordillera Huayhuash).

Además, se observa la existencia de una diferencia de 48 m entre los resultados obtenidos para la ELA glaciario y de 49 m para la PaleoELA, esto obedece al promedio de cotas máximas y mínimas con las que se trabajó en cada investigación, es decir los puntos más altos alcanzados por los glaciares ubicados en la vertiente suroeste de la Cordillera son menores a los que alcanzan los glaciares ubicados en los demás sectores de la Cordillera, lo cual es una característica propia del relieve y geomorfología del lugar.

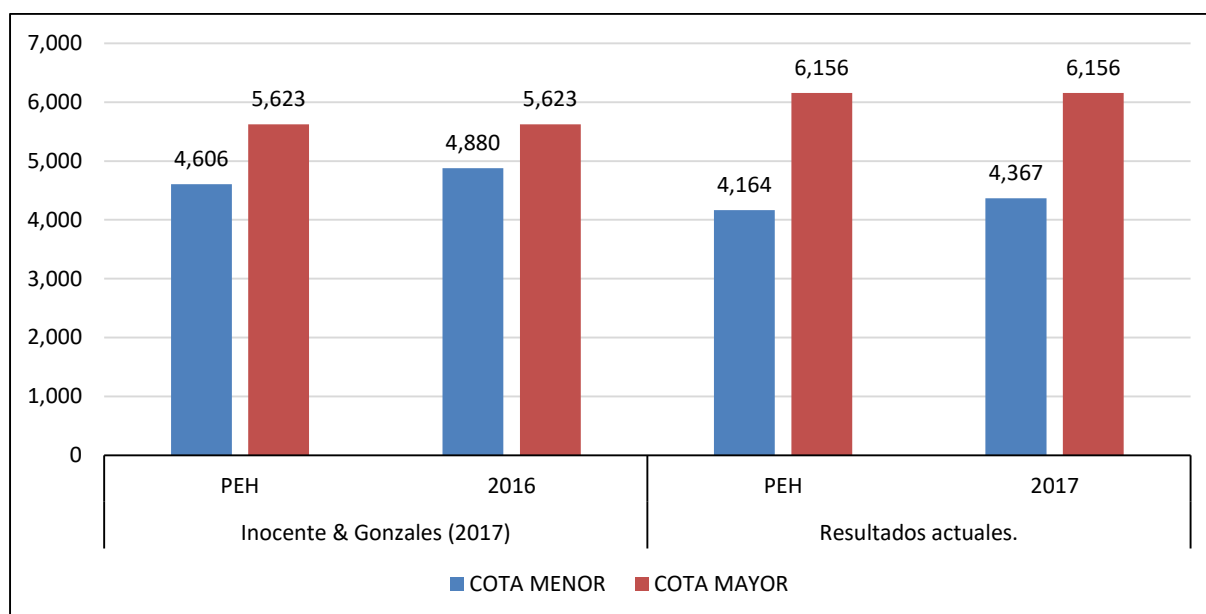


Figura 62. Cotas resultantes de la investigación de Inocente y Gonzales (2017) comparadas con las encontradas en la actual investigación.

La cota glaciario hace referencia a los puntos máximos y mínimos en los que se encuentran los glaciares de una determinada montaña, en este contexto, de la figura 62 se denota que durante la PEH las cotas de la vertiente suroeste del nevado Yerupajá se localizaban desde los 4606 m.s.n.m. hasta los 5623 m.s.n.m., mientras que los valores de cota estimados, respecto a todos los glaciares que conforman la cordillera Huayhuash (incluyendo los glaciares vertiente suroeste del nevado Yerupajá), fueron 4164 m.s.n.m. y 6156 m.s.n.m. respectivamente.

Así mismo, en la actualidad (2017) la cota más baja para encontrar un glaciar en la vertiente suroeste del nevado Yerupajá es a los 4880 m.s.n.m. y la cota máxima, es decir, el punto más alto que alcanza un glaciar es 5623 m.s.n.m.

Analizando el total de los nevados que conforman la cordillera Huayhuash (incluyendo los nevados de la vertiente suroeste del Yerupajá), la cota más baja en la que se ubica un glaciar es desde los 4363 m.s.n.m. y la cota más alta de 6156 m.s.n.m.

#### **5.1.4. Variación de la ELA en los Andes Centrales.**

Para hacer un análisis de la variación de la ELA, debemos tener en cuenta que las condiciones ambientales que influyen en el desarrollo los glaciares se hacen cada vez más dependientes de la altitud conforme disminuye la latitud, así mismo, considerar que a nivel regional existen factores geográficos independientes que modifican localmente la tendencia global.

En este sentido, los factores geográficos determinantes en los Andes Centrales están en función de la división de la cordillera en dos ramales (Cordillera Occidental y Oriental) y la presencia del altiplano con condiciones climáticas y geográficas propias. Además, la Cordillera provoca un efecto barrero diferenciando las condiciones climáticas entre la costa y el Amazonas. Como consecuencia de los factores geográficos regionales los periodos glaciales y fases de desglaciación pueden presentar desfases entre altas y bajas latitudes o entre las mismas latitudes de ambos hemisferios.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, comparamos los resultados obtenidos con los de otros estudios afines, detallados en la Tabla 38.

Tabla 38

*Comparación de la ELA obtenida con otros resultados*

	Cordillera Blanca			Cordillera Huayhuash		Nevado Sulcón	Cordillera Pariacaca	Cordillera Vilcabamba
	Glaciar Parón	Cuenca Ranrahirca	Vertiente SO Nevado Hualcán	Huayhuash	Vertiente SO Nevado Yerupajá			
Latitud (°S)	8.99	9.06	9.20	10.20	10.20	11.89	11.99	13.33
Longitud (°O)	77.67	77.62	77.52	76.90	76.90	76.05	75.99	72.55
Año de imágenes satelitales	2016	2016	2003	2017	2016	2010	2010	2017
ELA Actual (m)	5164	5260	5124	5209	5161	5246	5138	5115
ELA 1962 (m)	5114	5192	5018	5112	-	-	-	-
ELA PEH (m)	5058	5084	4994	5004	4955	5106	4998	4900

La cuenca Ranrahirca presenta el valor más alto de ELA en la PEH y 1962 (de 5260 m.s.n.m. y 5192 m.s.n.m. respectivamente). Esta cuenca está conformada por los nevados Huandoy, Pisco, Chacaraju, Yanapaccha, Chopicalqui y el Huascarán; nevado más alto del Perú (6768 m.s.n.m.).

Realizar conclusiones respecto a la diferencia entre los valores de ELA sería desacertado, pues presentan características geográficas independientes. Sin embargo, coinciden en el ascenso preocupante de este parámetro a lo largo de los periodos estudiados.

***Tendencia de la ELA a incrementarse de norte a sur***

Según Benn et. al (2005), la variación del parámetro ELA obedece principalmente a la localización de las montañas, los nevados ubicados más al oeste de los Andes Centrales presentarían cambios más significativos, debido a las tendencias regionales de la aridez.

Tabla 39

*Comparación con otros resultados ordenados de Este a Oeste (Longitud).*

	Cordillera Vilcabamba	Cordillera Pariacaca	Nevado Sulcón	Cordillera Huayhuash		Cordillera Blanca		
				Huayhuash	Vertiente SO del Nevado Yerupajá	Vertiente SO del Nevado Hualcán	Cuenca Ranrahirca	Glaciar Parón
Latitud (°S)	13.33	11.99	11.89	10.20	10.20	9.20	9.06	8.99
Longitud (°O)	72.55	75.99	76.05	76.90	76.90	77.52	77.62	77.67
Año de imágenes satelitales	2017	2010	2010	2017	2016	2003	2016	2016
ELA Actual (m)	5115	5138	5246	5209	5161	5124	5260	5164
ELA 1962 (m)	-	-	-	5112	-	5018	5192	5114
ELA PEH (m)	4900	4998	5106	5004	4955	4994	5084	5058

En este sentido, la figura 63 muestra que la teoría de la tendencia del incremento de los valores de ELA de este a oeste se cumple para Vilcabamba, Pariacaca, Vertiente Suroeste del Nevado Yerupajá, Cordillera Huayhuash y la Cuenca Ranrahirca. Sin embargo, se observa que Sulcón, Hualcán y Parón no cumplirían esta tendencia.

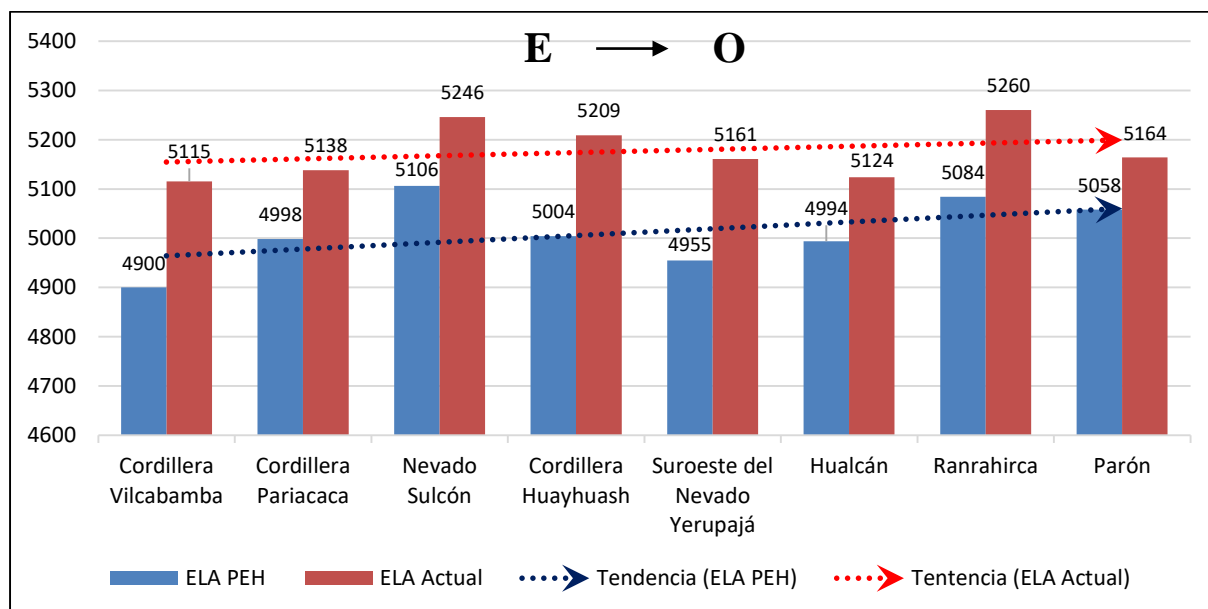


Figura 63. Resultados de las ELAs ordenados por su longitud (Este a Oeste).

Entre las razones por las cuales la tendencia no coincide del todo, pueden ser las técnicas empleadas para reconstruir las ELAs, los factores geográficos, bióticos, geológicos, antrópicos, etc.

### 5.1.5. Estimación del comportamiento predictivo de la ELA.

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, por lo que la elaboración de posibles escenarios futuros de los glaciares es un aspecto de interés dada la importancia que tienen los glaciares como reserva estratégica de agua en estado sólido.

En este sentido, la estimación del comportamiento predictivo de la ELA, al ser un indicador de una situación que no puede ser medida en forma directa, permite realizar pronósticos basados en la tendencia de la ELA, reflejando la variación que experimentarán en función del tiempo, con lo cual es posible deducir en que condición se encontrará para el año

2050 y 2100 el parámetro ELA y la disponibilidad futura de los recursos hídricos presentes en las reservas glaciares actuales.

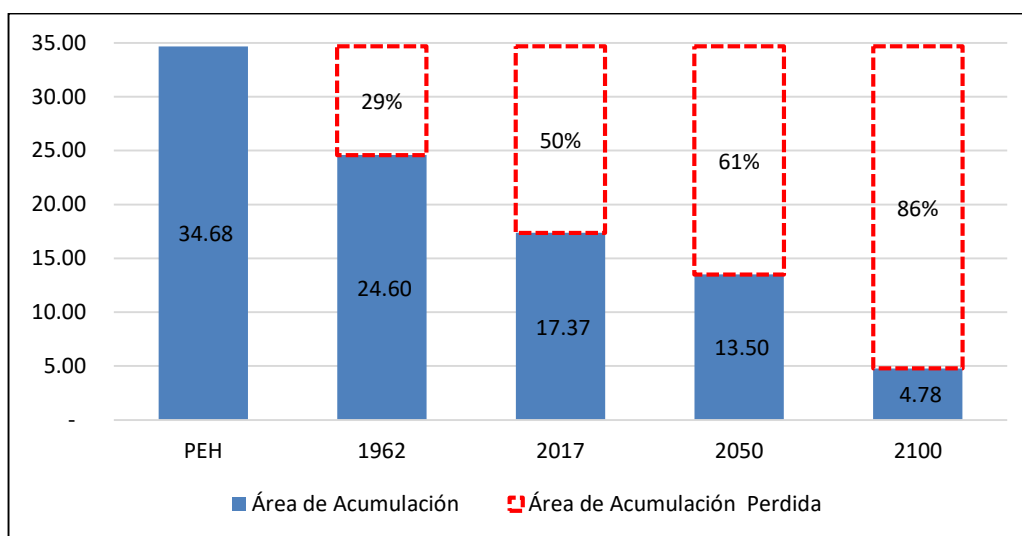


Figura 64. Área de acumulación según las predicciones de la ELA para el 2050 y 2100.

La figura 64, muestra el área de la zona de acumulación y pérdida glaciario obtenida para los periodos de la PEH, 1962 y 2017 con las predicciones para el 2050 y 2100 basados en el comportamiento de la ELA y el área de acumulación actual.

La proyección indica que al 2050 y 2100 la cordillera Huayhuash perderá su zona de acumulación glaciario un 61% y 86% respectivamente, es decir, perdería aproximadamente las tres cuartas partes del área que presenta en la actualidad.

Un error común para la estimación de estas predicciones es suponer que la línea de estimación puede aplicarse en cualquier intervalo de valores así el ajuste sea muy bueno, es decir con un valor de " $r^2$ " muy alto como es nuestro caso. Aun cuando una relación se cumpla para el intervalo de puntos de la muestra, puede existir una relación completamente distinta para un intervalo diferente. Una ecuación de estimación es válida sólo para el mismo rango dentro del cual se tomó la muestra inicialmente. (Levin, Rubin, 2004)

Además, debemos tener en cuenta que al utilizar datos históricos para estimar la ecuación de regresión. Las condiciones pueden cambiar en una o más de las suposiciones ya que dependen de variables en el tiempo influenciadas por factores climáticos (variación de la

precipitación anual, fenómenos de El Niño y La Niña, incidencia solar, etc.) y geográficos (movimientos sísmicos, erosión, etc.) que no contamos para la estimación.

En particular, para la situación que se ha analizado lo más probable es que la ELA mantendrá la misma tendencia que describe la ecuación hallada para el 2050 y 2100 de mantenerse las condiciones actuales, independientemente de las fluctuaciones y del margen de error que presenta la metodología.

#### **5.1.6. Variación de la temperatura registradas por la evolución glaciar.**

Según el (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.

Considerando la fragilidad de los glaciares ante las variaciones de temperatura, se hace evidente un escenario preocupante que provocaría un retroceso glaciar acelerado al impactar la temperatura en factores climáticos como la precipitación, afectándose el régimen hídrico que a su vez modificaría la distribución de los ecosistemas naturales de alta montaña que dependen de estos, como lagunas, bofedales altoandinas y bosques de polylepis y ecosistema de páramo principalmente.

En este sentido, en el presente trabajo se ha estimado la variación de temperatura de la cordillera Huayhuash por sector, en función a ELAs de los periodos PEH, 1962 y 2017 y del gradiente térmico vertical (GTV), a fin de demostrar el contraste de escenarios respecto a la temperatura para los tres periodos, se han comparado estas estimaciones con estudios afines realizados en nevados de los Andes Centrales y se intenta contribuir a las predicciones de escenarios futuros.



### ***Análisis comparativo de la variación de la temperatura por periodo y sector.***

La variación de la temperatura en la Cordillera Huayhuash en el periodo comprendido desde la PEH a 1962 es de 0.702°C y desde 1962 al 2017 de 0.631°C, es decir, el incremento de temperatura en los último 55 años es de 89.81% de lo que fue en 112 años.

El incremento de temperatura ocasiona alteraciones en factores climáticos como la precipitación, de forma que, en lugar de caer en estado sólido, cae en forma de lluvia lo cual no es favorable para los procesos de la acumulación, haciendo que predomine la ablación en el glaciar (Huss, 2015), es este contexto, esta sería una de las razones que explicaría el ascenso de ELA y la disminución de superficie y volumen en los glaciares de la Cordillera Huayhuash.

Respecto a los resultados de las estimaciones de temperatura en cada sector de la Cordillera, reflejan el disímil impacto de este factor, siendo las variaciones de 0.871°C para el sector Rapay, 1,333°C para Achín y 1.567°C para el Alto Marañón, en el periodo comprendido desde la PEH al 2017, lo cual obedece, como mencionamos en capítulos precedentes, a las características diferenciadas que posee la Cordillera.

En cuanto a las predicciones del ascenso de la temperatura y sus efectos, estudios refieren que el aumento de 3°C en la temperatura podría ocasionar una elevación de 600 metros, generando pérdida de hábitats ecosistema de páramo principalmente (Herzog et al., 2012).

Deducimos de lo anterior, al evidenciarse un incremento de la temperatura local y el ascenso de la ELA glaciar en Huayhuash, las repercusiones que se vienen dando en las poblaciones de las especies y en los ecosistemas locales en general, repercusiones que se hacen más tangibles si consideramos que en la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas por DS N° 004-2014-MINAGRI, se encuentran especies que habitan en la Cordillera Huayhuash tales como; *Anairetes alpinus* (torito de pecho cenizo) y el *Vultur gryphus* (cóndor andino) en peligro de extinción y especies

en estado vulnerable como el *Hippocamelus antisensis* (Taruca), *Oreotrochilus estella* (Picaflor), *Zaratornis stresemanni* (cotinga de Zárate).



Figura 65. Especies amenazadas de fauna silvestre en la cordillera Huayhuash.

### ***Comparativo de los resultados con los obtenidos por las estaciones del SENAMHI***

Al ser la PEH un periodo del que no tenemos registros instrumentales, se realizó una aproximación de la temperatura posible, siendo 11.228 °C el valor estimado, deducción realizada de la sustracción del valor marcado en el 2017 por la estación meteorológica más cercana a la Cordillera Huayhuash (Estación Cajatambo) con el valor de la variación de

temperatura estimada mediante la ecuación  $\Delta T = GTV \cdot \Delta ELA$ . Sin embargo, consideramos este valor demasiado impreciso, debido a que se centra en dos escenarios puntuales sin considerar los flujos de temperatura o fenómenos climáticos como “El Niño”, ocurridos en a lo largo de los años que lo conforman.

Respecto al año 1962, realizando el calculo detallado en el parrafo anterior, el aproximado de temperatura fue de 10.598 °C, considerando que para este periodo si contamos con registros, se hace posible determinar el promedio de la variación de temperatura por año y compararla con las estimaciones realizadas en este estudio.

Tabla 40

*Temperatura promedio de Cajatambo (2014-2018).*

Promedio por año	Promedio T (°C)
Promedio 2014	11.700
Promedio 2015	12.041
Promedio 2016	12.325
Promedio 2017	<b>11.228</b>
Promedio 2018	11.270

Con este propósito, se tomaron datos históricos de temperatura promediados anualmente desde el año 1963 hasta el 2017 del SENAMHI en la segunda estación meteorológica más cercana a la Cordillera Huayhuash, “Oyón”, ubicada las coordenadas 10°40' S y 76°46' O en el distrito de Oyón, provincia de Oyón en el departamento de Lima.

Cabe señalar que no consideramos datos de la estación meteorológica “Cajatambo” en este apartado, debido a que esta solo registra datos desde el 2014.

Los datos proporcionados por SENAMHI mostraban temperaturas máximas y mínimas diarias, a las cuales e las promedio para obtener temperaturas anuales promedio, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 41

*Media de Temperaturas registradas en la estación "Oyón"*

Año	T° Media	Año	T° Media	Año	T° Media
1963	10.116	1981	8.086	1999	9.93
1964	9.738	1982	7.882	2000	9.8
1965	10.007	1983	8.15	2001	10.525
1966	10.025	1984	No existen datos	2002	10.952
1967	9.569	1985	No existen datos	2003	11.002
1968	9.843	1986	10.064	2004	11.103
1969	10.472	1987	11.136	2005	10.893
1970	9.841	1988	10.638	2006	10.893
1971	9.208	1989	10.213	2007	No existen datos
1972	9.664	1990	10.042	2008	10.309
1973	9.575	1991	9.873	2009	10.939
1974	8.943	1992	10.557	2010	11.156
1975	9.148	1993	No existen datos	2011	10.392
1976	9.402	1994	10.235	2012	10.776
1977	9.613	1995	10.342	2013	11.133
1978	9.572	1996	10.102	2014	10.801
1979	9.199	1997	9.708	2015	11.068
1980	8.979	1998	11.258	2016	11.342
				2017	10.367
				<b>Promedio</b>	<b>10.090</b>

Nota: Adaptado de datos de la Estación Oyón, SENAMHI.

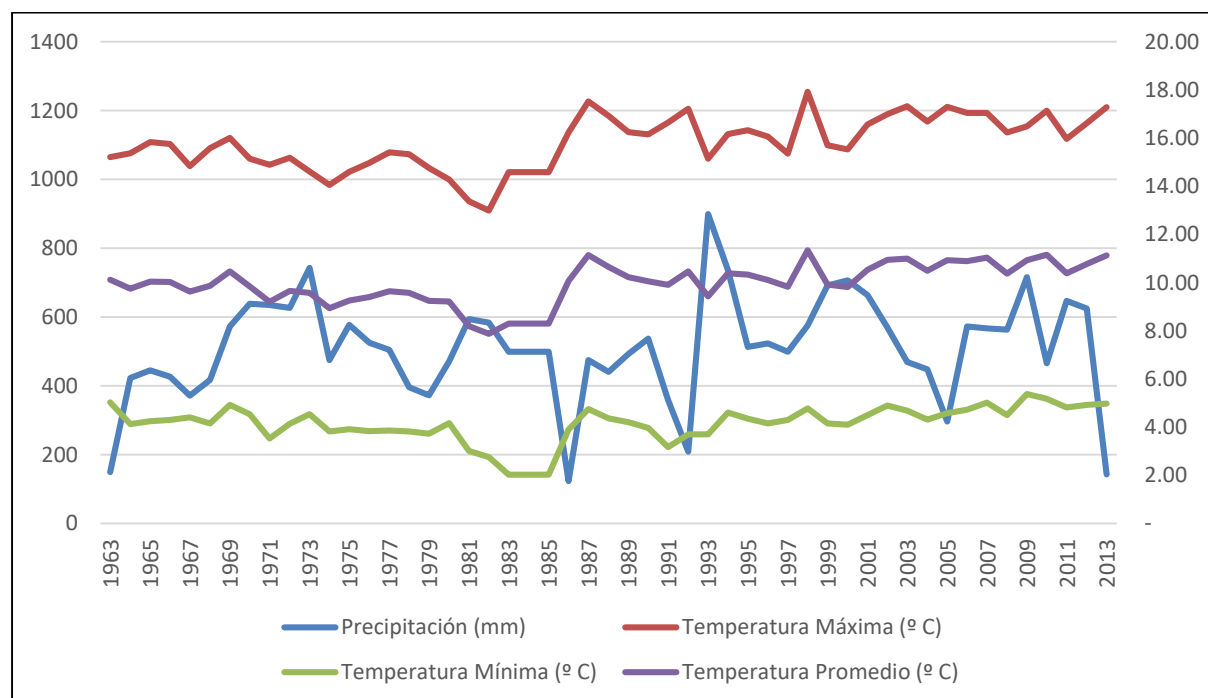


Figura 66. Precipitación, Temperatura máxima, mínima y promedio de la región aledaña estudiada (Oyón)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Estación Oyón, SENAMHI.

### *Comparativo de resultados obtenidos con otros estudios*

Para analizar la variación de temperatura estimada, es necesario conocer las características termo-pluviométricas de los Andes Centrales por ser la temperatura y la precipitación factores que influyen directamente en los glaciares.

En este sentido, precisamos que existe un marcado contraste termo-pluviométrico a un lado y a otro de las cordilleras, siendo árida y templada el lado que da hacia la costa del Pacífico (occidente) y, a causa de la situación anticiclónica permanente asociada a la corriente de Humboldt, presenta menor temperatura y precipitación que el lado que da hacia los territorios húmedos y cálidos de la cuenca del Amazonas (oriente), que por encontrarse bajo la influencia de la confluencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y las borrascas del frente polar antártico recibe fuertes precipitaciones y se caracteriza por una temperatura mayor.

Tabla 42

*Comparación de las variaciones de temperatura obtenidas con los de otros estudios.*

	Cordillera Blanca			Cordillera Huayhuash			Cordillera Pariacaca	Cordillera Vilcabamba
	Glaciar Parón	Cuenca Ranrahirca	Vertiente SO del Nevado Hualcán	Cordillera Huayhuash	Vertiente SO del Nevado Yerupajá	Nevado Sulcón		
Latitud (°S)	8.99	9.06	9.20	10.20	10.20	11.89	11.99	13.33
Longitud (°O)	77.67	77.62	77.52	76.90	76.90	76.05	75.99	72.55
Año de imágenes satelitales	2016	2016	2003	2017	2016	2010	2010	2017
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	0.69	1.1	0.845	1.333	1.35	0.91	0.91	1.4

Se observa que los resultados de temperatura de los estudios citados en la presente investigación varían entre 0.69 °C (temperatura estimada en los glaciares de Parón) a 1,40°C (temperatura estimada en los glaciares de Vilcabamba), con lo cual verificamos que los resultados obtenidos se encuentran dentro del promedio de las variaciones de temperatura desde la PEH a la actualidad.

Tabla 43

*Comparación de las variaciones de temperaturas regionales con los registros del IPCC*

	Cordillera Blanca			Cordillera Huayhuash		Nevado Sulcón	Cordillera Pariacaca	Cordillera Vilcabamba
	Glaciar Parón	Cuenca Ranrahirca	Vertiente SO del Nevado Hualcán	Huayhuash	Vertiente SO del Nevado Yerupajá			
Latitud (°S)	8.99	9.06	9.20	10.20	10.20	11.89	11.99	13.33
Longitud (°O)	77.67	77.62	77.52	76.90	76.90	76.05	75.99	72.55
Año de imágenes satelitales	2016	2016	2003	2017	2016	2010	2010	2017
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	0.69	1.1	0.845	1.333	1.35	0.91	0.91	1.4
Diferencias con las series de $\Delta T$ (1880-2012)	0.16	0.25	0.005	0.483	0.5	0.06	0.06	0.55
Diferencias con las series de $\Delta T$ (1850/1900-2003/2012)	0.09	0.32	0.065	0.553	0.570	0.130	0.130	0.620

Se puede observar discordancia de los nuestros resultados con las series de variación de temperatura de los registros instrumentales del IPCC, es notablemente mayor que el instrumental desde 1890 a 2012 o entre las series 1850/1900-2003/2012, puede deberse a que los cambios en el clima han sido tan relevantes que cada año se registran nuevos récords de temperaturas y precipitación mínimas y máximas a nivel mundial y local, cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850, además que desde el 2014 a la actualidad han sido los años más calurosos jamás registrados.

## 5.2. Conclusiones

- Se analizó el impacto de la variación de la temperatura en los procesos de desglaciación registrados por la evolución glaciar de la cordillera Huayhuash. Este análisis indica que, por efecto de la variación de la temperatura, se ha reducido el área y el volumen glaciar de la cordillera, se ha extinto 13 y 6 glaciares para los periodos PEH-1962 y 1962-2017 respectivamente y 8 de los glaciares actuales estarían condenados a desaparecer por encontrarse debajo de la ELA glaciar.
- Se analizó la variación de la temperatura relacionada con las variaciones de superficie y volumen glaciar. Este análisis indica un incremento de 1.333 °C de la temperatura cuyos efectos se reflejan en la PEH-1962 con la pérdida de 20.037 km<sup>2</sup> de superficie glaciar representando un 30.69%, además de 2,167.644 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar perdido que representan el 44.25%. Y de 1962-2017 con la pérdida de 10.786 km<sup>2</sup> de superficie glaciar representando un 23.48%, además de 1,523.445 Mm<sup>3</sup> de volumen glaciar perdido que representan el 55.78%.
- Se analizó la variación de la temperatura relacionada con las variaciones de ELA. Siendo el valor estimados para la ELA de 5004 m (PEH), 5112 m (1962) y 5209 m (2017), siendo el desnivel por periodo de 108 m (PEH-1962) y de 97 m (1962-2017).

### 5.3. Recomendaciones

- Dada la importancia de evaluar la evolución de la dinámica glaciar frente a los efectos del calentamiento global que causa el cambio climático actual, aplicar la metodología utilizada en esta investigación es una excelente alternativa para contrarrestar la deficiencia de datos históricos anuales, por lo cual se recomienda aplicar y mejorar esta metodología en otras investigaciones.
- Recomiendo también, aumentar redes de monitoreo que nos permitan mejorar la precisión de los resultados.
- Así mismo es conveniente realizar cada cierto periodo de tiempo un cálculo del área y volumen glaciar de la cordillera Huayhuash para poder dar seguimiento al avance o retroceso de sus glaciares.
- Así como la temperatura, la precipitación, radiación solar y los vientos son factores importantes para poder tener información más acertada de los efectos del Calentamiento Global en los glaciares. Por ende, se recomienda tomar en cuenta estos factores para aplicarlos dentro de la metodología.
- Por último, teniendo en cuenta que los glaciares son importantes reservas de agua dulce, es preciso conocer la disponibilidad con la que contamos anualmente, se recomienda continuar con trabajos de investigación de este tipo, esta información es muy útil para nuestras autoridades al momento de desarrollar e implementar instrumentos normativos para la gestión sostenible de los recursos hídricos.



## CAPÍTULO VI. FUENTES DE INFORMACIÓN

### 6.1. Fuentes bibliográficas

- Ackerman F. & Stanton E. (2011). *Climate Risks and Carbon Prices: Revising the Social Cost of Carbon*. Documento de análisis sobre Economía No.2011-40, Kiel Institute for the World Economy
- Ames, A., S. Dolores, A. Valverde, C. Evangelista, D. Javier, W. Ganwini y J. Zuniga. (1989). *Glacier Inventory of Peru, Part I*. Hidrandina S.A. Huaraz, Perú.
- ANA. UGRH (2014). *Inventario de lagunas glaciares del Perú*. Huaraz: Autoridad Nacional del Agua. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos.
- Belmonte, A. (2010). *La huella de los glaciares en el paisaje*. IV Seminario del Geoparque del Sobrarbe "Glaciares: hielo, relieve y clima".
- Benn, D.I., Owen, L.A., Osmaston, H.A., Seltzer, G.O., Porter, S.C. & Mark, B.G. (2005) *Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers*. Quaternary International, 138-139: 8-21.
- Benn, D. I. and N. R. J. Hulton (2010). *An Excel (TM) spreadsheet program for reconstructing the surface profile of former mountain glaciers and ice caps*. Computers & Geosciences, 36(5), pp.605-610.
- Carlson, A. (2013). *The Younger Dryas Climate Event*. The encyclopedia of quaternary science, 126-134.
- Carrillo, Eduardo & Yépez, Santiago. (2010). *Evolución de glaciares en Venezuela: glaciares de los Picos Humboldt y Bonpland*. 42. 97-108.
- Ceballos, J.L., Euscategui, C., Ramirez, J., Canon, M., Huggel, C., Haeberli, W., Machguth, H. (2006). *Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia*. Ann. Glaciol., 43, 194-201.

- Concha, R. (2015). *Evolución Glaciar a finales del Holoceno, en los Nevados Salcantay y Huamantay, y su Impacto frente al Cambio Climático (Cusco - Perú)*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
- Concha, Úbeda & Igor Astete (2017). *Cálculo de la ELA geomorfológica a finales del holoceno en glaciares de la Cordillera de Vilcabamba, Cusco*.
- Concha, R., J. Iparraguirre, J. Úbeda, G. Luna y P. Vásquez. (2018). *Evolución de los glaciares desde la Pequeña Edad de Hielo en la cuenca Parón (Cordillera Blanca – Ancash)*.
- Ehlers, J. & Gibbard, P. L. (2004). *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology*. Series Editor J. Rose, Developments in Quaternary Science 2, Elsevier, London.
- Francou, B., E. Ramírez, B. Cáceres y J. Mendoza. (2000). *Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia and Antizana, Ecuador*.
- Francou, B., M. Vuille, V. Favier y B. Cáceres. (2004). *New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana, Andes of Ecuador, 0°28'S*. Journal of Geophysical Research 109: D18106.
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J.E., Silvestre, E.E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J.L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune, Y., Ramallo, C., & Mendoza, J. (2014). *Glaciares de los andes Tropicales: Víctimas del Cambio Climático*. CAN-PRAA-IRD.
- Georges, C. (2004). *The 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru*. Arctic Antarctic and Alpine Research 36(1): 100–107.
- Giráldez, C. (2011). *Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru)*. Universidad Complutense de Madrid (España), p. 125.  
<http://eprints.ucm.es/14013/>

- Hall S., Farber D., Ramage J., Rodbell D., Finkel R. (2009). *Geochronology of Quaternary glaciations from the tropical Cordillera Huayhuash, Peru*
- Hansen, James, Makiko Sato & Reto Ruedy (2012). *Perceptions of Climate Change: The New Climate*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS).
- 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).
- Huddart, 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.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). *Hoja metodológica del indicador Balance de masa (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 10p
- Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Lima
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares. Las cordilleras glaciares del Perú*. Huaraz
- Inocente, F. & J. Gonzales. (2017). *Análisis del Efecto del Calentamiento Global en la Desglaciación al Suroeste del Nevado Yerupajá – Huayhuash*.
- Iparraquirre et al., (2018). *Evolución glaciaria desde la Pequeña Edad de Hielo a la actualidad de los glaciares de la cuenca Ranrahirca, Cordillera Blanca, Perú*.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007b). *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Aporte del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC.
- 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.
- Johnson, A. M. (1976). *The climate of Peru, Bolivia and Ecuador*. Elsevier.
- Kaser, G., I. Juen, C. Georges, J. Gómez y W. Tamayo. (2003). *The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru*. Journal of Hydrology.
- Kaser, G., M. Grosshauser y B. Marzeion. (2010). *Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes*. Proceedings of the National Academy of Sciences
- Levin, R. I. y Rubin, D. S. (2004). *Estadística para la administración y economía*. (7a ed.). México, Pearson Educación
- Linsbauer, A., F. Paul and W. Haeberli. (2012). *Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach*. Journal of Geophysical Research, 117(F3).
- Lugo, J (2011). *Diccionario geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México
- Mark, B. G., J. M. McKenzie y J. Gómez. (2005). *Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru*. Hydrological Sciences Journal.
- Mark, B. G. & J. M. McKenzie. (2007). *Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water*. Environmental Science and Technology 41(20): 6955–6960.

- McLaughlin, D.H. (1924). *Geology and physiography of the Peruvian cordillera, Departments of Junin and Lima*. Geological Society of American Bulletin 35.
- Myers, J.S., (1976). *Erosion surfaces and ignimbrite eruption, measures of Andean uplift in northern Peru*. Geological Journal. Pag. 29–44
- Muñoz, J. (1995). *Geomorfología general*. Madrid: Síntesis.
- Nelson, G. (2010). *The Costs of Agricultural Adaptation to Climate Change*. Documento para análisis No. 4, Washington, DC, Banco Mundial.
- Nesje, A. & Dahl, S. (2003). *The "Little Ice Age" - only temperature*.
- Nye, J.F. (1952b). *The mechanics of glacier flow*. J. Glaciol. 2, 82–93
- Nye, J. F. (1965). *The flow of a glacier in a channel of rectangular, elliptic or parabolic cross-section*. J. Glaciol., 5(41), 661–690.
- OMS (2003a). *Informe sobre la salud en el Mundo 2003: forjemos el futuro*. Ginebra, Organización Mundial de la Salud.
- 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.
- Pellitero, Ramón & R. Rea, Brice & Spagnolo, Matteo & Bakke, Jostein & Ivy-Ochs, Susan & Hughes, Philip & Lukas, Sven & Ribolini, Adriano. (2015). *A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes*. Computers & Geosciences.
- Pellitero, R., Rea, B.R., Spagnolo, M., Bakke, J., Ivy-Ochs, S., Frew, C.R., Hughes, P., Ribolini, A., Lukas, S., Renssen, H., (2016). *GlaRe, a GIS tool to reconstruct the 3D surface of palaeoglaciers*. Computers & Geosciences 94, 77-85.
- Poveda, G. & K. Pineda. (2009). *Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? Advances in Geosciences*

- Quirós, T. (2013). *Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa (Perú)*. Tesis de fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid (España). 51 p.
- Rabatel, A., A. Machaca, B. Francou & V. Jomelli (2006). *Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia since the maximum of the Little Ice Age (17th century)*. Journal of Glaciology.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gómez, B. Cáceres, J. L. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J.-E. Sicart, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, J. Mendoza, M. Ménégoz, E. Ramírez, P. Ribstein, W. Suarez, M. Villacis & P. Wagnon. (2013). *Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change*. The Cryosphere.
- Rabatel, A., Deline, P., Jaillet, S., & Ravanel, L. (2008). *Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area*. Geophysical Research Letters.
- Rabatel, Francou, Cáceres, S., Ceballos, & Wagnon, B. (2013). *Evolución reciente de los glaciares en los Andes Tropicales*.
- Racoviteanu, A. E., Y. Arnaud, M. W. Williams & J. Ordoñez. (2008). *Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing*. Journal of Glaciology.
- Ribstein, P., E. Tiriau, B. Francou & R. Saravia. (1995). *Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia*. Journal of Hydrology.
- Rozanski, K. & Gonfiantini, R. (1990). *Isótopos en estudios climatológicos*. BOLETÍN DEL OIEA, 4

- Ruiz, L. (2013). *Análisis geomorfológico, sedimentológico y crono-estratigráfico, de depósitos glaciales, periglaciales y glaciogénicos, en la Cordillera de los Andes y zonas adyacentes entre el paralelo 42° y el 43° LS, desde la última glaciación*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Schubert, C. (1992). *The glaciers of the Sierra Nevada de Mérida (Venezuela), a photographic comparison of recent deglaciation*.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI (2018). *Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. Estación Oyón*. Recuperado de <https://senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
- SIGTIERRAS (2015). *Manual de identificación de geoformas. Proyecto: Levantamiento de cartografía temática*.
- Solomina, O., Haeberli, W., Kull, C., & Wiles, G. (2007). *Historical and holocene glacierclimate variations: General concepts and overview*. Global and Planetary Change.
- Tejada, G. (1994). *Vocabulario geomorfológico*. Ediciones Akal
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E.E., Dansgaard, W., Grootes, P.M., (1986). *The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap*. Science 234, 361-364.
- Úbeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú)*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid (España), p. 558
- Vásquez, E. (2015). *Registro Glacial del Cambio Climático en el Macizo Sulcón - Cordillera Central. Perú*.
- Vásquez, E., & Úbeda, J. (2016). *Enfriamiento del clima con respecto al presente deducido del último avance de los glaciares en el Nevado Sulcón (Andes Centrales)*. XVIII Congreso Peruano de Geología.

- Vásquez, P., G. Luna, J. Iparraguirre, J. Úbeda, R. Concha y R. Pellitero. (2018). *Ensayo de métodos para reconstruir el volumen de los glaciares, en 2016, 1962 y la Pequeña Edad del Hielo, en el valle Suiricocha, Cordillera Pariacaca, Perú.*
- Viviroli, D., D. Archer, W. Buytaert, H. J. Fowler, G. B. Greenwood, A. F. Hamlet, Y. Huang, G. Koboltschnig, M. I. Litaor, J. I. Lopez-Moreno, S. Lorentz, B. Schaedler, H. Schreier, K. Schwaiger, M. Vuille & R. Woods. (2011). *Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research management and policy.* Hydrology and Earth System Sciences
- Vuille, M., B. Francou, P. Wagnon, I. Juen, G. Kaser, B. G. Mark & R. S. Bradley. (2008a). *Climate change and tropical Andean Glaciers-Past, present and future.* Earth Science Reviews
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). *Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing.* J. Geophys, 2447–12460.
- J. Alfred Zinck (2012). *Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales.*



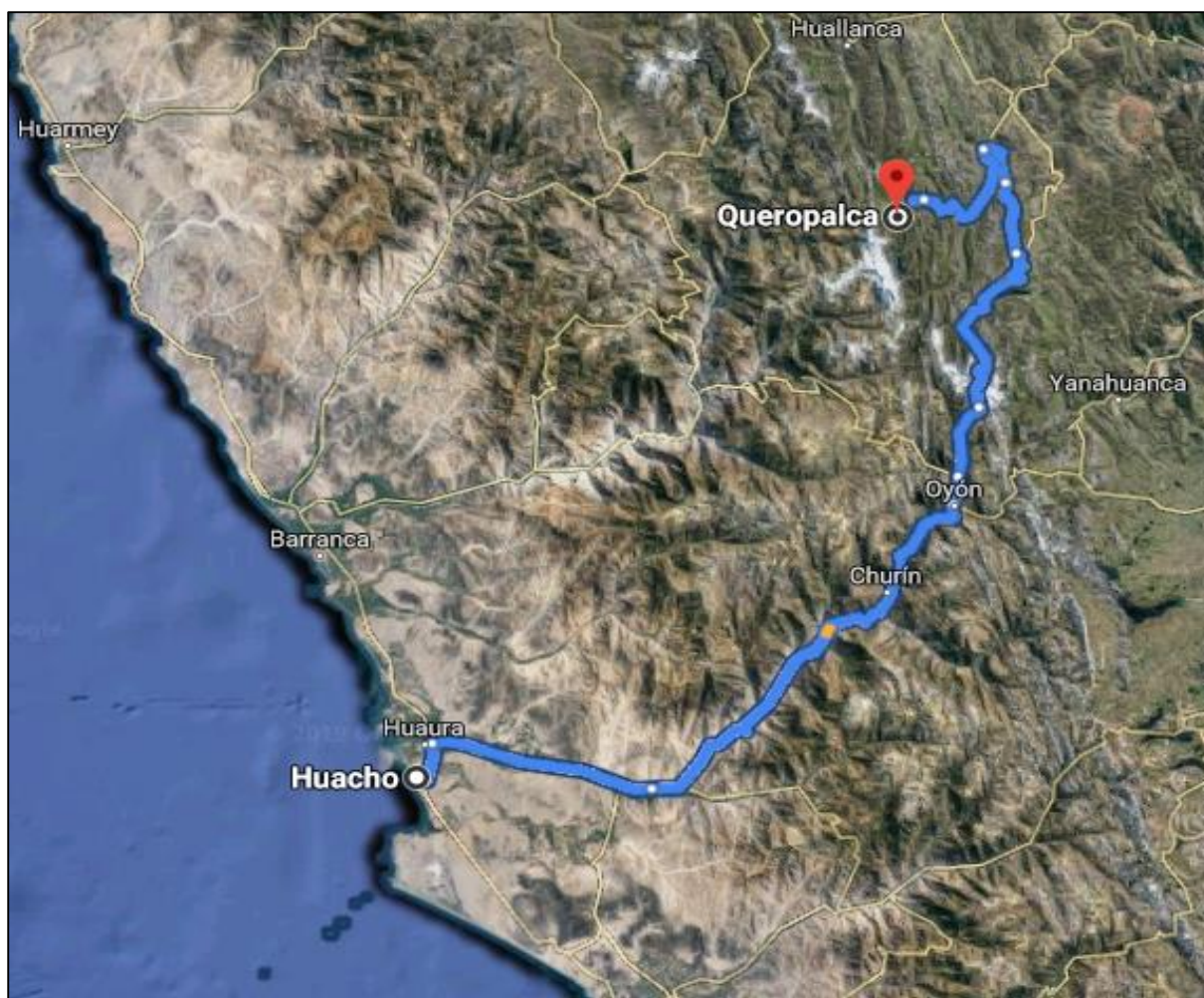
## ANEXOS

**Anexo 1.** Matriz de consistencia:

Título: “Impacto de la Variación de Temperatura en la Desglaciación de la Cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco)”.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variabes	Metodología	Indicadores
<p><b>Problema General:</b> ¿Cómo el impacto de la variación de temperatura se relaciona con la desglaciación en la cordillera Huayhuash en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?</p>	<p><b>Objetivo General:</b> Analizar el impacto de la variación de temperatura y su relación con la desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p><b>Hipótesis General:</b> El impacto de la variación de temperatura se relaciona directamente con la desglaciación de la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b> Variación de la temperatura de la PEH al año 1962</p>	<p>-Análisis geomorfológico y cartografía glaciar.</p>	°C
<p><b>Problema Específico 1:</b> ¿De qué manera la variación de temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona con la variación de la superficie y volumen glaciar en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?</p>	<p><b>Objetivo Específico 1:</b> Analizar la variación de la temperatura en grados Celsius (°C) y su relación con la variación de la superficie y volumen glaciar en cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p><b>Hipótesis Específica 1:</b> La variación de la temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona directamente con la variación de la superficie y volumen glaciar en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p><b>Variable dependiente:</b> Variación de la superficie glaciar</p>	<p>-Cálculo volumétrico de los glaciares del año 2017 por la metodología GLABTOP.</p> <p>-Cálculo del lecho basal de los glaciares del año 2017.</p>	°C
<p><b>Problema Específico 2:</b> ¿De qué manera la variación de temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona con la variación de la ELA en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017?</p>	<p><b>Objetivo Específico 2:</b> Analizar la variación de la temperatura en grados Celsius (°C) y su relación con la variación de la ELA en cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p><b>Hipótesis Específica 2:</b> La variación de la temperatura en grados Celsius (°C) se relaciona directamente con la variación de la ELA en la cordillera Huayhuash (Lima-Ancash-Huánuco) en la Pequeña Edad de Hielo (siglo XVI al XIX), en el año 1962 y en 2017.</p>	<p>Variación del volumen glaciar</p> <p>Variación de la ELA</p>	<p>-Cálculo volumétrico de los glaciares del año 1962 y PEH mediante la herramienta GLARE.</p> <p>-</p> <p>Reconstrucción de ELAs actuales y pasadas por el método AABR con la herramienta ELA_Calculation.</p> <p>-Estimación de la variación de la temperatura desde la PEH al año 2017 a partir de las ELAs de cada periodo.</p>	km <sup>2</sup>  Mm <sup>3</sup>  m.

**Anexo 2.** Recopilación de imágenes de la Visita al área de estudio.



*Figura 67.* Recorrido desde la ciudad de Huacho a Queropalca (Prov.- Lauricocha – Dep. Huánuco)



*Figura 68.* Ruta de acceso al lado oeste de la cordillera Huayhuash desde Queropalca.



*Figura 69.* Plazuela de Queropalca-Lauricocha-Huánuco, punto de partida.



*Figura 70.* Vista de la cordillera Huayhuash a la salida de Queropalca (6:00 am)



*Figura 71.* Ascenso por camino de herradura hacia la cordillera Huayhuash.



*Figura 72.* Vista de la cordillera Huayhuash, primera parada (Quishuarcancha).



*Figura 73.* A 20m de la laguna Siula (Quishuarcancha).



*Figura 74.* Laguna Siula y vista frontal de la cordillera Huayhuash.



*Figura 75. Laguna Grangajanca.*



*Figura 76. Cordón morrénico de la laguna Grangajanca.*