



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto Nacional de  
Investigación en Glaciares y  
Ecosistemas de Montaña - INAIGEM



# MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES

Noviembre - 2017  
Huaraz - Perú



Trabajando para  
todos los peruanos

# **INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA – INAIGEM**

Dr. Benjamín Morales Arnao  
*Presidente Ejecutivo*

Sr. Jorge Rojas Fernández  
*Secretario General*

Ing. Ricardo Villanueva Ramírez  
*Director (e) de Investigación en Glaciares*

Ing. David Ocaña Vidal  
*Director de Investigación en Ecosistemas de Montaña*

Ing. Ricardo Villanueva Ramírez  
*Director de Información y Gestión del Conocimiento*



# **MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES**





**Instituto Nacional de Investigación en Glaciares  
y Ecosistemas de Montaña**

# **MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES**



**Huaraz - 2017**

## MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES

**Preparado en la Subdirección de Investigación Glaciológica de la Dirección de Investigación en Glaciares del INAIGEM, con la intervención del siguiente personal:**

### Implementación SIG y teledetección

Ing. Judith Eliana Torres Castillo  
Ing. Edwin Loarte Cadenas

### Preparación y tabulación de tablas

Ing. Judith Eliana Torres Castillo

### Dibujo y elaboración de figuras y mapa

Tec. Iván Méndez Obregón  
Ing. Judith Eliana Torres Castillo  
Bach. Alberto Castañeda Barreto  
Bach. Yadira Andrea Curo Rozales

### Digitación de información bibliográfica

Lic. Nadia Vega Macedo  
Bach. Danilo Yauri Caldua  
Bach. Vannine Julca Norabuena

### Revisión del manual

Ing. Marco Zapata Luyo  
Ing. Ricardo Villanueva Ramírez  
Mg. Sc. Hernán Vega Mejía  
Ing. Luzmila Dávila Roller  
Ing. Daniel Colonia Ortiz  
Bib. Giber García Álamo

### Editado por:

©Instituto Nacional de Investigaciones en Glaciares y Ecosistemas de Montañas  
Dirección de Información y Gestión del Conocimiento.  
Biblioteca y Publicaciones  
Jr. Juan Bautista 887, Huaraz, Ancash, Perú  
Teléfono: (043) 22-1766 / (043) 45-6234  
Web: www.inaigem.gob.pe

### Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2017-12673

Primera edición, noviembre de 2017

Tiraje: 1000 ejemplares

Impreso en: Corporación Globalmark S.A.C.

551.312 Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña  
I59

Manual metodológico de inventario nacional de glaciares / Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Huaraz : INAIGEM, 2017.

119 p. : il. tab. fot. graf.

1. Inventario de glaciares 2. Metodología 3. Perú
- I. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
- II. Título



**Resolución de Presidencia Ejecutiva  
N° 061-2017-INAIGEM/PE**

Huaraz, 20 de setiembre de 2017

**VISTOS:**

El Memorando N° 0254-2017-INAIGEM/DIGC, de fecha 20 de setiembre de 2017, remitido a la Secretaría General por la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento; el Informe N° 012-2017-INAIGEM/SG-OPPM-LGCC remitido mediante Memorandum N° 790-2017-INAIGEM/SG-OPPM, de fecha 20 de setiembre de 2017, con los antecedentes alcanzados por la Dirección de Investigación en Glaciares; y,

**CONSIDERANDO:**

Que, mediante Ley N° 30286 se crea el Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM, como organismo técnico especializado, adscrito al Ministerio del Ambiente, con autonomía administrativa, funcional, técnica, económica, financiera y personería jurídica de derecho público, constituyéndose en pliego presupuestal;

Que, el literal g) del artículo 4° de la Ley N° 30286, dispone como función y atribución del INAIGEM, entre otras, realizar el Inventario Nacional de Glaciares, Lagunas y Bofedales, determinando su cantidad, estado y superficie, para cuyo objeto es necesario contar con los instrumentos metodológicos que faciliten la elaboración de dicho Inventario;

Que, asimismo, los literales j) del artículo 32°; f) y k) del artículo 34°; y d) del artículo 45° del Reglamento de Organización y Funciones del INAIGEM, aprobado mediante Decreto supremo 044-2016-MINAM, precisan las responsabilidades de conducción, elaboración y ejecución del Inventario Nacional de los Glaciares en el Perú; así como la formulación de métodos y procedimientos para la generación y sistematización de la información, en coordinación con las unidades de línea del INAIGEM;

Que, mediante Informe N° 012-2017-INAIGEM/SG-OPPM-LGCC se emite opinión favorable sobre la propuesta alcanzada a la Secretaría General con Memorando N° 0254-2017-INAIGEM/DIGC, por la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento, así como los antecedentes remitidos por la Dirección de Investigación en Glaciares, proponiendo la aprobación del “Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares”, con la finalidad de uniformizar los criterios técnicos y procedimientos para una adecuada ejecución del inventario de glaciares, así como para investigaciones glaciológicas y estudios del cambio climático y conocer el estado actual de los glaciares,



Resolución N° 061-2017-INAIGEM/PE

con información estandarizada y disponible a través de una base de datos, para contribuir a la mejora de la gestión de recursos hídricos y gestión de riesgos de origen glaciar;

Que, resulta conveniente que las entidades vinculadas del ámbito público y privado cuenten con herramientas orientadoras y prácticas que permitan uniformizar métodos y procedimientos que contribuyan a contar con una información técnica y de calidad científica, dentro del proceso de realización y ejecución del Inventario Nacional de los Glaciares en el Perú;

Que, el INAIGEM es la máxima autoridad en investigación científica de los glaciares y ecosistemas de montaña, responsable de realizar el Inventario Nacional de Glaciares, Lagunas y Bofedales, siendo necesario para ello contar con el instrumento metodológico que permita su elaboración, correspondiendo emitir el acto administrativo que formalice la aprobación del Manual que se propone, conforme a las atribuciones que le confieren al Presidente Ejecutivo el literal e) del artículo 14° de la Ley N° 30286 y los literales c) y l) del artículo 16° del Reglamento de Organización y Funciones del INAIGEM;

Con el visado de la Dirección de Investigación en Glaciares, la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento, la Secretaría General, la Oficina de Planeamiento, Presupuesto y Modernización, y la Oficina de Asesoría Jurídica, y;

De conformidad a lo establecido en la Ley N° 30286, Ley de creación del Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM, y el Decreto Supremo N° 004-2016-MINAM que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del INAIGEM;

#### SE RESUELVE:

##### Artículo 1°.- Aprobación de Manual

Aprobar el “Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares”, el mismo que consta de XII ítems, que como Anexo I forma parte de la presente Resolución.

##### Artículo 2°.- Ámbito de aplicación

Precisar que para los efectos de uniformizar métodos y procedimientos en el desarrollo del proceso, la aplicación del Manual alcanza a las entidades vinculadas del ámbito público y privado que contribuyan con la realización del Inventario a que se refiere la presente Resolución.

##### Artículo 3°.- Publicación

Disponer la publicación de la presente Resolución de Presidencia Ejecutiva en el Diario Oficial El Peruano y el “Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares” en el Portal Institucional del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM ([www.inaigem.gob.pe](http://www.inaigem.gob.pe)).

**Regístrese, comuníquese y publíquese.**

  
 .....  
 Ing. BENJAMIN MORALES ARNAO  
 Presidente Ejecutivo  
 Instituto Nacional de Investigación en  
 Glaciares y Ecosistemas de Montaña



# CONTENIDO

	Pág.
PRESENTACIÓN	13
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
ALCANCE	17
CONSIDERACIONES GENERALES	17
CORDILLERAS GLACIARES EN EL PERÚ	17
SECUENCIA DEL MANUAL	19
I. CONCEPTOS BÁSICOS	21
1.1. Definiciones	23
1.1.1. Glaciar	23
1.1.1.1. Partes de un glaciar	23
1.1.2. Tipos de glaciares	25
II. PROGRAMAS INFORMÁTICOS	27
III. SISTEMAS DE GEORREFERENCIA	31
3.1. Datum	33
3.2. Proyección cartográfica	33
IV. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL	35
V. ADECUACIÓN Y GENERACIÓN DE INFORMACIÓN	39
VI. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE	43
6.1. Corrección geométrica	45
6.2. Corrección radiométrica	46
VII. MAPEO DE LOS GLACIARES	49
7.1. Glaciar blanco	51
7.1.1. Índice Normalizado de Diferenciación de Nieve	51
7.2. Glaciar cubierto	57
7.3. Individualización de la cobertura glaciar	62
VIII. INSPECCIÓN TÉCNICA DE CAMPO	63
8.1. Requerimiento de personal	65
8.2. Preparación de material de trabajo	65
8.3. Preparación de equipo de trabajo	66
IX. BASE DE DATOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS GLACIARES	67
9.1. Generación de la base de datos	69
9.2. Características de los glaciares	71

X.	APLICACIÓN METODOLÓGICA	83
	10.1. Distribución de glaciares	85
	10.2. Distribución de altitud mínima	87
	10.3. Orientación	87
	10.4. Pendiente	88
	10.5. Clasificación de la morfología glaciar	89
	10.6. Reducción del área glaciar	91
	10.7. Tabla sistémica y listado alfabético de glaciares inventariados	92
XI.	ELABORACIÓN DEL MAPA	95
	11.1. Definición del área de impresión	97
	11.2. Adecuación del entorno de impresión	98
	11.3. Grillas	101
	11.4. Leyenda	102
	11.5. Membrete	103
	11.6. Producción de mapas	104
XII.	ESTRUCTURA DEL CONTENIDO PARA LOS INFORMES DEL INVENTARIO DE LAS CORDILLERAS GLACIARES DEL PERÚ	105
	12.1. Metodología	107
	12.1.1. Etapa I: Recopilación de información geoespacial	107
	12.1.2. Etapa II: Procesamiento	108
	12.1.3. Etapa III: Mapeo de glaciares	108
	12.1.4. Etapa IV: Caracterización de glaciares	108
	12.1.5. Etapa V: Elaboración del informe técnico	109
	12.1.6. Etapa VI: Publicación	109
	12.2. Diagrama del proceso de elaboración del informe	111
	12.3. Resultados de las coberturas glaciares en las cordilleras del Perú	111
	12.4. Estructura del informe	112
	GLOSARIO	113
	BIBLIOGRAFÍA	117
	ANEXOS	119

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Tipologías más recurrentes para la clasificación de glaciares	25
Tabla N° 2. Principales programas informáticos (software) para el inventario de glaciares	29
Tabla N° 3. Zonas de coordenadas UTM en el Perú	33
Tabla N° 4. Disponibilidad de información existente	37
Tabla N° 5. Bandas espectrales de Sentinel 2	47
Tabla N° 6. Definición de escala y AMC de mapeo	51
Tabla N° 7. Parámetros morfológicos según GLIMS	79
Tabla N° 8. Características de los campos en las tablas de atributos	80
Tabla N° 9. Datos generales del inventario	85
Tabla N° 10. Datos del inventario según unidades hidrográficas	85
Tabla N° 11. Clasificación morfológica de los glaciares. Caso: subcuenca Santa Cruz	89
Tabla N° 12. Reducción de área glaciar. Caso: subcuenca Santa Cruz	91
Tabla N° 13. Listado alfabético de los glaciares. Caso: subcuenca Pariac	92
Tabla N° 14. Lista sistémica de inventario de glaciares. Caso: subcuenca Pariac	93
Tabla N° 15. Características de los layouts	99
Tabla N° 16. Características del norte magnético y escala gráfica	99
Tabla N° 17. Características de los modelos mostrados en el mapa	99
Tabla N° 18. Características de las anotaciones	100
Tabla N° 19. Características de las grillas	101
Tabla N° 20. Características de los símbolos de la leyenda	102
Tabla N° 21. Características del membrete	103
Tabla N° 22. Prioridad de inventario según las áreas glaciares	111

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1. Partes de un glaciar y zonas circundantes	24
Figura N° 2. Sistema de coordenadas geográficas	33
Figura N° 3. Zonas UTM para el Perú	34
Figura N° 4. Derivados del MDE	41
Figura N° 5. Proceso de corrección geométrica. Caso: subcuenca Santa Cruz	46
Figura N° 6. Obtención de cobertura glaciar en la subcuenca Pariac, el NDSI (izquierda) y clasificación (derecha) de la zona glaciar en color naranja	52
Figura N° 7. Herramienta para el cálculo del NDSI	53
Figura N° 8. Llenado de campos para la herramienta Raster Calculator	53

Figura N° 9. Datos de entrada en los campos para la herramienta Reclassify	54
Figura N° 10. Raster del ND; valores de -1 a 1 (Izquierda) y reclasificación de la zona glaciar de 0.4 a 1 y zona no glaciar de < 0.4 (derecha)	54
Figura N° 11. Llenado de campos para la herramienta Raster to Polygon	55
Figura N° 12. Conversión del formato raster al formato shapefile tipo polígono	55
Figura N° 13. Selección de polígonos de interés	56
Figura N° 14. Análisis de la cobertura glaciar en círculos de color rojo bajo sombra	57
Figura N° 15. Interpretación y delimitación del glaciar cubierto	58
Figura N° 16. Visualización de superficies de glaciar cubierto a través de la imagen Google Earth	58
Figura N° 17. Generación de polígono que define la superficie de hielo cubierto	59
Figura N° 18. Digitalización de la superficie de cobertura glaciar	59
Figura N° 19. Polígono guardado en formato kml	60
Figura N° 20. Formato kml convertido al formato de capa vectorial	60
Figura N° 21. Visualización de la cobertura de glaciares no cubiertos en la imagen Sentinel 2 RGB: 432	61
Figura N° 22. Edición de la cobertura de glaciares no cubiertos (límite de color amarillo) y digitalización de los glaciares cubiertos (límite de color azul)	61
Figura N° 23. Individualización de la cobertura glaciar	62
Figura N° 24. Creación de la geodatabase	69
Figura N° 25. Creación del Feature Dataset	70
Figura N° 26. Creación del Feature Class	70
Figura N° 27. Estructura de la base de datos	71
Figura N° 28. Generación del campo y asignación del nombre de la cordillera en la tabla de atributos de la cobertura de glaciares	72
Figura N° 29. Código nacional del glaciar	72
Figura N° 30. Toponimia de los glaciares	72
Figura N° 31. Definición de coordenadas UTM y geográficas	73
Figura N° 32. Toponimia de departamento, provincia y distrito	73
Figura N° 33. Toponimia de cuenca, subcuenca y microcuenca	73
Figura N° 34. Pendiente del glaciar en %	74
Figura N° 35. Orientación predominante para cada glaciar	74
Figura N° 36. Atributos (derecha) y cobertura glaciar (izquierda) con la clasificación de tipo	74
Figura N° 37. Nombre del tipo de imagen satelital	75
Figura N° 38. Adición del código de la imagen de satélite en el campo "Cod_Imagen"	75
Figura N° 39. Asignación de fecha de toma de la imagen del satélite en el campo "Fecha"	75

Figura N° 40. Altitud mínima y máxima del glaciar	77
Figura N° 41. Digitalización del largo y ancho del glaciar	78
Figura N° 42. Numeración de glaciares	78
Figura N° 43. Proporción de tipo de glaciares	86
Figura N° 44. Distribución de glaciares por rangos de área	86
Figura N° 45. Variaciones de área glaciar por altitud mínima	87
Figura N° 46. Concentración de área y cantidad de glaciares según orientación	88
Figura N° 47. Concentración de área y cantidad de glaciares según pendientes	88
Figura N° 48. Cambio de área glaciar. Caso: subcuenca Santa Cruz	91
Figura N° 49. Cambio de área glaciar por rango de tamaño	92
Figura N° 50. Herramientas más usadas del ArcMap	97
Figura N° 51. Herramienta layout view	98
Figura N° 52. Herramienta Page and print setup	98
Figura N° 53. Distribución de la información a mostrar en el mapa	99
Figura N° 54. Enumeración de las mallas que representa el layout principal	101
Figura N° 55. Pasos para insertar las grillas según coordenadas geográficas y UTM	101
Figura N° 56. Pasos para incluir la leyenda en el mapa base al layout principal	102
Figura N° 57. Distribución de la información del membrete proveniente de la sistematización de mallas	104
Figura N° 58. Mapa modelo para inventario de glaciares	104
Figura N° 59. Diagrama de la metodología del inventario	110
Figura N° 60. Proceso del informe para su publicación	111

## MAPA

Mapa N° 1. Ubicación de las cordilleras del Perú	Pág. 18
--	------------

## LISTA DE ANEXOS

Anexo N° 1. Flujo de trabajo para el cálculo de la cobertura glaciar (NDSI)	Pág. 119
Anexo N° 2. Formato de ficha de inspección de campo	119

## SIGLAS

ALOS	:	Advanced Land Observation Satellite.
AMC	:	Área Mínima Cartografiable.
ANA	:	Autoridad Nacional del Agua.
ASF	:	Alaska Satellite Facility.
ASTER	:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
CBERS	:	China-Brazil Earth Resources Satellite.
COFOPRI	:	Organismo de Formalización de la Propiedad Informal.
CONAM	:	Comisión Nacional del Ambiente.
CONCYTEC	:	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.
CSI	:	Consortium for Spatial Information.
ELA	:	Altitud de la Línea de Equilibrio.
ESA	:	European Space Agency (Agencia Espacial Europea).
ECHO	:	Eos Clearing House.
ETH	:	Escuela Politécnica Federal
GLCF	:	Global Land Cover Facility.
GLIMS	:	Global Land Ice Measurements from Space.
IGN	:	Instituto Geográfico Nacional.
INAGGA	:	Instituto Andino de Glaciología y Geoambiente.
INAIGEM	:	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
INPE	:	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales.
IPA	:	International Permafrost Association.
MDE	:	Modelos digital de elevación.
MINAGRI	:	Ministerio de Agricultura y Riego.
MINAM	:	Ministerio del Ambiente.
ND	:	Niveles Digitales.
NDSI	:	Normalized Difference Snow Index.
PALSAR	:	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar.
ROF	:	Reglamento de Organización y Funciones.
SIG	:	Sistemas de Información Geográfica.
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission.
USGS	:	United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos).
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
WGMS	:	World Glacier Monitoring Service.
WGS	:	World Geodetic System.

# MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES



**Laguna Sibinacocha y nevado Huayruro Punco,  
Cordillera Vilcanota**





## PRESENTACIÓN

Entre los años 1932 y 1939, la Sociedad Alpina Austro - Germana realizó tres expediciones a la Cordillera Blanca, dirigidas por los eminentes científicos P. Borchers, H. Kinzl, E. Schneider y H. Hoemlin; fruto de las cuales nos han legado significativos resultados de sus investigaciones en las disciplinas como la Geografía, la Geología y la Glaciología, todo aquello expuesto en un hermoso libro titulado "Cordillera Blanca". La obra, acompañada de dos mapas levantados por fotogrametría terrestre: uno en la escala 1:200,000 de toda la Cordillera Blanca y, el otro, de los sectores Norte y Sur a la escala 1:100,000, con curvas de nivel cada veinticinco metros, muestran con detalle la morfología de la cordillera. Estos mapas son, hasta la fecha, fuente indispensable para conocer a profundidad la Cordillera Blanca. Ambos trabajos científicos, tanto el libro como los mapas, constituyen el primer documento referencial de inventario de los glaciares y lagunas de la Cordillera Blanca.

A consecuencia del aluvión de la laguna Palcacocha del 13 de diciembre de 1941, que destruyó la tercera parte de la ciudad de Huaraz con el doloroso saldo de cuatro mil víctimas, el gobierno del presidente Manuel Prado dispuso una serie de acciones efectivas a cargo del Instituto Geológico del Perú, dando inicio a una serie de estudios de los glaciares y lagunas de la Cordillera Blanca. Así, eminentes geólogos e ingenieros civiles como Jaime Fernández Concha, Mariano Iberico y Alberto Giesecke, así como destacados cartógrafos como Hermin Hoempler, recorrieron por primera vez las quebradas y lagunas de la Cordillera Blanca dando inicio al primer inventario de los glaciares y lagunas de la Cordillera Blanca, el que quedó plasmado en el famoso plano a la escala 1:100,000 que demarcaba los límites de los glaciares y de las lagunas, donde se indicaban los volúmenes y características principales de la composición de los diques de las lagunas glaciares. Sin duda este es el primer inventario oficial de los glaciares y lagunas de la Cordillera Blanca.

En 1951, el Ministerio de Fomento y Obras Públicas, creó la Comisión de Control de Lagunas de la Cordillera Blanca con el objeto de desaguar aquellas consideradas en peligro de desborde violento, iniciando de esta manera la delicada tarea de brindar seguridad a las poblaciones que pudieran ser afectadas. Luego, la Comisión fue transferida al Ministerio de Agricultura donde permaneció hasta el año 1967, en que sus funciones fueron transferidas a la Corporación Peruana del Santa.

En 1966, la Corporación Peruana del Santa, formó el Departamento de Glaciología y Recursos Hídricos, encargado de la investigación de los glaciares y del monitoreo hidrometeorológico de la cuenca del río Santa, que tuvo el honor de dirigir una vez concluida mi capacitación en Glaciología en el ETH de Zurich. En 1967 la Corporación Peruana del Santa asumió las funciones de la Comisión del Control de Lagunas de la Cordillera Blanca. Esta situación hace que el Departamento de Glaciología y Recursos Hídricos se convierta en la División de Glaciología y Seguridad de Lagunas, encargada de la investigación de los glaciares y de la seguridad de las lagunas de la Cordillera Blanca. Como parte de las funciones asignadas, y en coordinación con la Universidad de Zurich, se envió a Suiza al señor Alcides Ames Márquez con el fin de perfeccionarse en la tecnología del inventario de glaciares siguiendo la metodología GLIMS. De este modo, entre 1970 y 1989 se inicia en el Perú, de manera sistemática, el inventario nacional de los glaciares siguiendo dicha metodología, gracias a lo cual en 1989 Hidrandina y el CONCYTEC publican el primer inventario nacional de glaciares.

Seguidamente, desde setiembre de 1997 a mayo de 1998, el Instituto de Glaciología y Geo Ambiente – INAGGA recibió el encargo del Consejo Nacional del Ambiente – CONAM (organismo

público que precedió al Ministerio del Ambiente) la elaboración del estudio de vulnerabilidad de los recursos hídricos de la alta montaña del Perú; cuyo resultado fue presentado a la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Este trabajo, que me cupo el honor de dirigir al lado de destacados profesionales en la materia como Alcides Ames y Pablo Lagos, trata acerca de la situación de los glaciares peruanos y muestra los resultados del estudio del inventario practicado a nivel nacional. En los hechos, este viene a ser el segundo inventario nacional de glaciares elaborado en el Perú.

Luego, en el año 2006, la Autoridad Nacional del Agua – ANA da inicio a los trabajos que llevarían a concretar el tercer inventario nacional de glaciares y lagunas que concluyó en el año 2010, y fue publicado en el año 2014 por la ANA.

Hoy, en tiempos signados por el acelerado proceso de cambio climático, donde se perciben disminuciones aceleradas de las superficies glaciares y de los recursos hídricos como fuente de vida de las poblaciones, la información de la situación de los glaciares se torna en un imperativo a fin de generar respuestas certeras y oportunas en períodos cortos y en términos de investigación aplicada. Por ello, con el presente trabajo que el INAIGEM entrega, se busca contar con una metodología que permita contar con inventarios que abarquen períodos de tiempo más cortos, máximo con dos años de intervalo, de modo que los glaciares, como reservas hídricas, sean un referente valioso para el correcto planeamiento de los servicios ecosistémicos de las montañas peruanas.

El INAIGEM, como organismo técnico especializado adscrito al Ministerio del Ambiente, máxima autoridad en investigación científica de los glaciares y ecosistemas de montaña, ha visto por conveniente establecer una metodología para la investigación de los glaciares, a fin de que los organismos públicos -de los tres niveles de gobierno-, las universidades y las organizaciones privadas orientada al desarrollo de los conocimientos glaciológicos, cuenten con un patrón tecnológico para el inventario de glaciares que oriente sus acciones en beneficio de las poblaciones del entorno de las montañas del Perú.

El INAIGEM felicita al personal profesional que ha estado encargado de la confección del presente “Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares” y pone a disposición del país este documento técnico que, no dudamos, será de gran utilidad.

Huaraz, noviembre de 2017

Dr. Benjamín Morales Arnao  
*Presidente Ejecutivo del INAIGEM*

# INTRODUCCIÓN

En el territorio del Perú, considerado como un país de montaña, se encuentra el 71% de los glaciares tropicales, los cuales están situados entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, formando una gran franja alrededor del Ecuador. Durante los últimos 54 años, como resultado del cambio climático, los glaciares tropicales andinos peruanos se han reducido en promedio en un 53.56%. Debido a su latitud, son particularmente sensibles y vulnerables a los aumentos de temperatura que ocasiona la elevación del punto de congelación, aspecto que coincide con el calentamiento de la troposfera altoandina.

La dinámica generada en los glaciares tropicales ha traído serias consecuencias: primero, el incremento de los aluviones de origen glaciar, y segundo, la reducción de la disponibilidad del recurso hídrico para consumo humano y actividades económicas dependientes; motivo por el cual, es necesario contar con información confiable y oportuna sobre la cobertura glaciar a nivel nacional, empleando metodologías estandarizadas que garanticen la realización de un adecuado inventario y monitoreo de nuestros glaciares, generando información para una adecuada toma de decisiones por parte de las diferentes autoridades públicas y privadas involucradas en el desarrollo nacional.

En este contexto, el INAIGEM pone a disposición de las instituciones académicas, de investigación y ejecución, públicos o privados -que por función y/o actividad desarrollan conocimientos acerca del comportamiento de los glaciares y sus impactos-, el presente documento denominado **“Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares”**, que precisa los lineamientos para estandarizar criterios y procedimientos para desarrollar los inventarios de glaciares en el ámbito nacional.

El manual está compuesto por *XII etapas* a través de las cuales se va guiando al “ejecutor” de manera orgánica y sistemática desde la *I etapa*, que consiste en conocer los conceptos y términos básicos; pasando por la *II etapa* que describe los programas informáticos usados, la *III etapa* que identifica el sistema de referencia geodésica, la *IV y V etapas*, que realizan la recopilación, adecuación y generación de información geoespacial; asimismo, la *VI etapa*, consiste en el procesamiento de imágenes de satélite, que es la base para la *etapa VII*, en que se ejecuta el mapeo de glaciares. La *VIII etapa* corresponde a la inspección técnica de campo, la *IX etapa*, que fundamenta la generación de la base de datos con información y la caracterización de los glaciares; y las últimas *etapas X, XI y XII* que describen la aplicación metodológica y elaboración de mapas, así como la presentación de la estructura de contenido de los informes de inventario de las cordilleras glaciares del Perú.

Además, cabe destacar que la elaboración del presente Manual se basó en el uso del software Arcgis 10.4, se emplearon las imágenes satelitales Sentinel – 2 y el Modelo Digital de Elevación (MDE) ALOS PALSAR (Advance Land Observation Satellite) de resolución 12.5 m.

Finalmente, agradecemos la participación de autoridades y especialistas que intervinieron en las diferentes etapas y procesos de elaboración del presente Manual.



## OBJETIVOS

### General

Establecer un procedimiento validado para el correcto desarrollo del inventario de glaciares a nivel nacional, para un mejor conocimiento de los recursos hídricos, de los riesgos de origen glaciar y de las consecuencias del cambio climático y su incidencia sobre las poblaciones vulnerables.

### Específicos

- Proporcionar criterios y procedimientos estandarizados para el correcto desarrollo de un inventario de glaciares.
- Establecer las especificaciones requeridas para el registro y medición de los parámetros o atributos que caracterizan y permiten analizar el comportamiento de los glaciares.
- Brindar un documento técnico como fuente de consulta para las instituciones públicas y privadas en la elaboración de estudios e investigaciones relacionadas a glaciares.

## ALCANCE

El presente manual constituye un documento técnico dirigido a todas las instituciones públicas y privadas del ámbito nacional que, por sus funciones, realizan estudios e investigaciones relacionados al ámbito de los glaciares y de sus impactos asociados; así también constituye un documento técnico-académico para los docentes y estudiantes de las universidades del país que desarrollan investigaciones científicas en el campo ambiental.

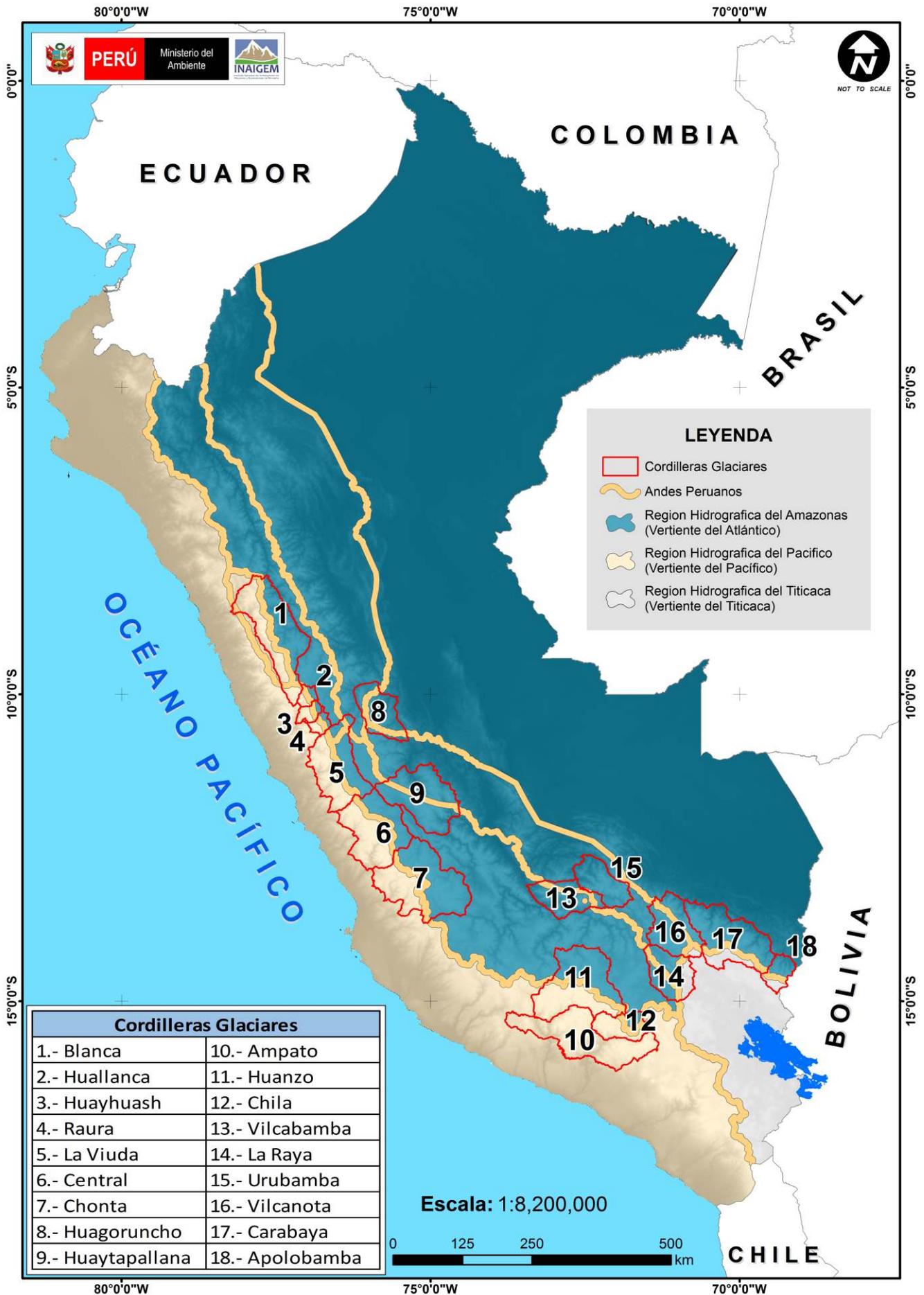
## CONSIDERACIONES GENERALES

Antes de dar inicio a los trabajos de inventario, deben de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El presente manual constituye un estándar metodológico de carácter general aplicable a todo trabajo de inventario de glaciares a nivel nacional.
- b) El mapeo de la cobertura glaciar, la fecha de captura de las imágenes satelitales y las inspecciones de campo, deben realizarse en la misma época del año, entre junio y setiembre, debido a las condiciones atmosféricas favorables.
- c) El inventario de glaciares se desarrollará con una periodicidad de dos años, período que permitirá observar la evolución de los cambios en superficie y volumen.

## CORDILLERAS GLACIARES EN EL PERÚ

Las cordilleras glaciares del Perú (Mapa N° 1), se ubican en los Andes Tropicales, entre los paralelos 7°32'1"-16°48'52" latitud Sur y 68°56'54"- 80°27'25" longitud Oeste. Las cordilleras se dividen en los Andes del Norte, Centro y Sur, que se ubican en 12 departamentos del país; hidrológicamente localizados en las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca.



Mapa N° 1. Ubicación de las cordilleras glaciares del Perú.

## SECUENCIA DEL MANUAL

**I. Conceptos Básicos**

---

**II. Programas Informáticos**

---

**III. Sistemas de Georreferencia**

---

**IV. Recopilación de Información Geoespacial**

---

**V. Adecuación y Generación de Información**

---

**VI. Procesamiento de Imágenes de Satélite**

---

**VII. Mapeo de los Glaciares**

---

**VIII. Inspección Técnica de Campo**

---

**IX. Base de Datos y Caracterización de los Glaciares**

---

**X. Aplicación Metodológica**

---

**XI. Elaboración del Mapa**

---

**XII. Estructura del Contenido de los Informes del Inventario de las Cordilleras Glaciares del Perú**

---





# I. CONCEPTOS BÁSICOS





## 1.1. Definiciones

Debido a los objetivos operativos del presente manual, es necesario aclarar la nomenclatura y tipología del término principal, para que pueda ser reconocido por los operadores sin lugar a ambigüedades.

### 1.1.1. Glaciar

Existen múltiples definiciones de glaciar. De todas ellas, se ha tomado como base para este trabajo, la propuesta del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001) que define al **glaciar** como: *"masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes"*.

Si bien esta definición es más amplia que otras utilizadas para estudios específicos, concuerda con los lineamientos generales dados por el World Glacier Monitoring Service (WGMS) y la International Permafrost Association (IPA), y además, cumple con la propiedad principal que debe tener un cuerpo de hielo para ser incluido en el inventario; es decir, su condición de reserva de agua en estado sólido.

#### 1.1.1.1. Partes de un glaciar

- a. **Zona de acumulación:** es aquella con cantidad de nieve y hielo acumulada a lo largo de un año hidrológico. Proporciona información acerca de la cantidad de precipitaciones sólidas recogidas por el glaciar durante un año hidrológico (Francou, 2004 y Pouyaud, 2008).
- b. **Zona de ablación:** es la zona del glaciar donde predominan los procesos de fusión (pérdida de hielo en forma líquida), evaporización, sublimación y desprendimiento de masas de hielo. (Francou, 2004 y Pouyaud, 2008).
- c. **Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA):** es la línea teórica que separa la zona de acumulación y la zona de ablación. En la primera zona predominan los procesos de ganancia, que propician la conservación de la nieve y su transformación en hielo; en la segunda zona, prevalecen la fusión y la sublimación que favorecen la pérdida de masa glaciar. (Úbeda, 2010).

Andrews (1975) sostuvo que *"los parámetros cuantificables más usados para la identificación de la variabilidad climática de los glaciares es la Altitud de la Línea de Equilibrio (siglas en inglés, ELA)"*. Los glaciares, a su vez, son indicadores muy sensibles al cambio climático, permitiendo analizar la influencia climática y caracterización ambiental de las zonas con presencia de cobertura glaciar. (Figura N° 1).

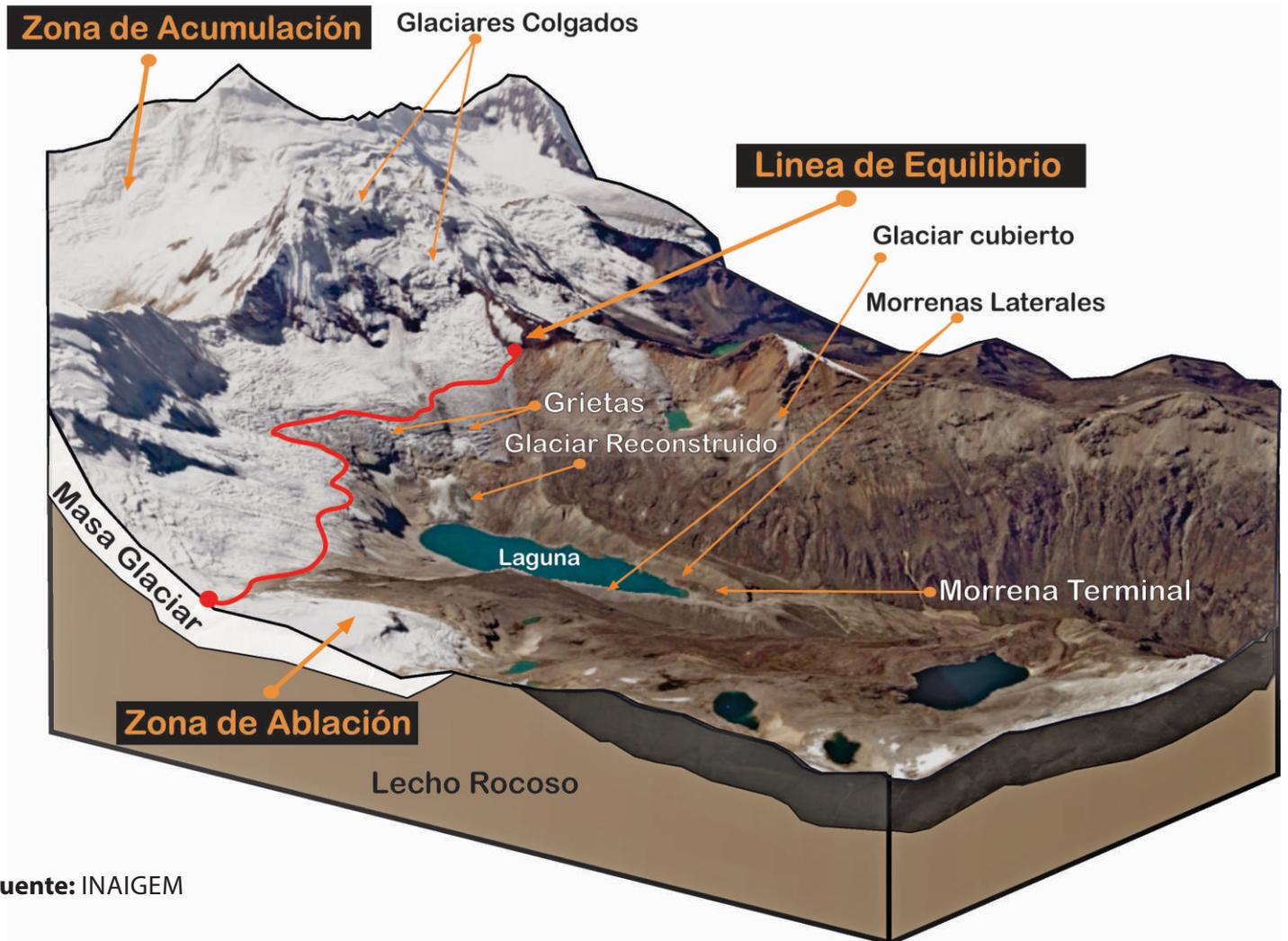


Figura N° 1. Partes de un glaciar y zonas circundantes.

### 1.1.2. Tipos de glaciares

Pese a que a simple vista los glaciares pueden percibirse como homogéneos o similares entre ellos, en realidad son diferentes. Con el paso de los años los glaciólogos han tratado de agruparlos bajo distintos criterios; pero, a partir de sus observaciones han determinado que las formas, las dinámicas y la localización de las masas de hielo son aspectos que permiten diferenciar los tipos de glaciares. Bajo estas premisas, se han definido distintas tipologías para identificar las diferentes masas de hielo del mundo, que responden a criterios específicos en cada caso. En la Tabla N° 1, se presenta una síntesis de las propuestas de diferentes autores.

**Tabla N° 1. Tipologías más recurrentes para la clasificación de glaciares.**

Parámetro de clasificación	Tipo	Descripción
<b>Morfología</b>	Valle	Son glaciares que siguen la trayectoria de un valle preexistente, la lengua glaciar es alargada.
	Montaña	Masas de hielo adheridas a las paredes rocosas, cuyo frente glaciar se encuentra alejada de los valles, distribuida generalmente en pendientes pronunciadas.
	Glaciaretos	Pequeñas masas de hielo, cuyas zonas de acumulación y ablación no son claramente detectables, este tipo de glaciar generalmente se presenta en glaciares fragmentados.
	Capa de hielo	Masa glaciar en forma de domo, cuyo flujo es en forma radial.
<b>Temperatura</b>	Templados	La temperatura del hielo es de 0°C. Existe agua entre la masa de hielo y una probabilidad más alta de deformación. Estos glaciares se desplazan sobre los flujos de agua líquida de la base.
	Fríos	Glaciares por debajo del punto de fusión, sin agua basal y poco aporte superficial.
<b>Dinámica</b>	Activos	Glaciares con movimiento rápido y evacuación de detritos.
	Pasivos	Glaciares que fluyen lentamente, lo cual dificulta la evacuación de rocas y la conformación de morrenas. Asociados a masas de hielo en retroceso
	Estáticos	Glaciares que no tienen alimentación y presentan lenta fusión del hielo. Pueden considerarse como "relictos sin movimiento".
<b>Contenido de impurezas</b>	Limpio	Glaciares "Blancos" con cobertura superficial característica de nieve y hielo.
	Cubiertos	Glaciares cubiertos parcial o total por restos adyacentes (detritos y/o fragmentos de rocas) erosionados en su área terminal .
	De roca	Denominados también glaciares rocosos, presentan una acumulación lenta de restos rocosos (angulares), generalmente con un patrón de cresta / surco distintivo y pendientes empinadas y laterales, cuya longitud es generalmente mayor que su ancho (en forma de lengua) existente en un valle de montaña.
<b>Localización</b>	Polares	Ubicados en latitudes altas o zonas polares.
	Ecuatoriales / Tropicales	Ubicados cerca de la línea ecuatorial.
	Intertropicales internos	Ubicados entre los trópicos y cercanos a la línea ecuatorial (por ejemplo, Colombia y Ecuador).
	Intertropicales externos	Ubicados entre los trópicos y alejados de la línea ecuatorial (por ejemplo, glaciares de Perú y Bolivia).

**Fuentes:** (IDEAM, 2012), (Frank, Mauz, Singh Khalsa, & Raup, 2005) (Bijeesh, Sebastián, Shanshan, & Pedro, 2016), (Rice, 1982), (Leet y Judson, 1997), (Strahler, 1981) y (Marangunic, 2008).

En el caso de los glaciares peruanos, las formas especiales que tienen se deben a la posición geográfica y, naturalmente, al clima imperante en la zona. A causa de la posición geográfica los glaciares son de tipo Ecuatorial, el clima imperante en esta región, hace que exista una fuerte ablación sobre los ventisqueros, que no permiten la formación de corrientes de hielo hacia niveles bajos. En este contexto, podemos encontrar algunas clasificaciones frecuentemente usadas en el territorio peruano para la identificación de los glaciares, siendo estas las siguientes:

- a. **Glaciares Colgados:** Bloques de hielo y nieve acumulados durante años, ubicados por lo general en la parte superior de los glaciares (adheridas a las paredes rocosas), conocidas también como “Seracs”, con alta probabilidad de desprendimiento o desplome, a causa de la dinámica natural del glaciar, cambios atmosféricos como el incremento de la temperatura ambiental en el glaciar y otros factores.
  
- b. **Glaciares Muertos:** estos glaciares están cubiertos por una importante “morrena de ablación”, sin tener casi alimentación en su parte superior; razón por la que se inmovilizan y comienzan a mermarse lentamente por toda su superficie; quedando al final una capa más o menos uniforme de detritos, y no formando en ningún caso un arco morrénico. Los depósitos de estos glaciares están ligeramente diferenciados en dos capas. La capa inferior que corresponde a la “morrena de fondo” está constituida por piedras angulosas; y la superficial, constituida de cantos rodados, corresponde a la “morrena de ablación”. Algunas veces quedan -en el seno de estos-, depósitos de masas de hielo abandonadas denominadas “hielo muerto” o “hielo fósil”, no vistos en otras latitudes.
  
- c. **Glaciares Reconstituidos:** son aquellos que no tienen una fuente directa de alimentación, estando formados por la acumulación de bloques de hielo desprendidos de los glaciares colgados. Estos bloques, al unirse nuevamente en las partes bajas del talud (se sueldan entre sí), forman una nueva corriente glaciar, supeditada a la continua caída de aludes de hielo. Ejemplo de este tipo lo encontramos en las partes inferiores del nevado Copa (Cordillera Blanca), donde durante el día ocurren grandes desprendimientos de hielo que producen un sordo ruido en la estrecha quebrada.

## II. PROGRAMAS INFORMÁTICOS







Para la elaboración de un inventario de glaciares se deben usar programas que trabajan con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten consultar cualquier tipo de información geográfica referenciada, asociada a un territorio. Debido a la capacidad para leer la información en diferentes formatos, como imágenes de satélite y modelos digitales de elevación y facilitar los procesos de grandes volúmenes de datos, es recomendable trabajar también con programas de teledetección. (Tabla N° 2).

**Tabla N° 2.** Principales programas informáticos (software) para el inventario de glaciares.

Línea	Procesos	Programas informáticos (Software)
<b>SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistematización de cartas topográficas.</li> <li>• Delimitación del ámbito de estudio.</li> <li>• Obtención de cobertura glaciar- Normalized Difference Snow Index (NDSI).</li> <li>• Determinación de parámetros y caracterización de los glaciares.</li> <li>• Base de datos del inventario de glaciares.</li> <li>• Elaboración de mapas temáticos.</li> </ul>	ARCGIS
<b>TELEDETECCIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento de imágenes de satélite.</li> <li>• Adecuación y generación de Modelos Digital de Elevación (MDE) y derivados.</li> <li>• Análisis multitemporal.</li> </ul>	ENVI ERDAS IMAGINE

Además de los programas informáticos (software) mencionados, considerados didácticos, amigables y más comerciales, en los procesos SIG y de TELEDETECCIÓN, es posible utilizar otros programas libres y gratuitos como: QGIS, GvSIG, SAGAGIS, ORFEO, SNAP, entre otros, que por sus limitaciones es recomendable que se complementen entre ellos. La disponibilidad de estas herramientas permite realizar los geoprosesamientos ofreciendo resultados apropiados en el cálculo de los datos del inventario.



## III. SISTEMA DE GEORREFERENCIA





### 3.1. Datum

**World Geodetic System 1984 (WGS84):** Sistema geodésico recomendado para usarlo en: la generación de información geoespacial, producción de mapas temáticos y localización a nivel mundial de los glaciares. (Figura N° 2).

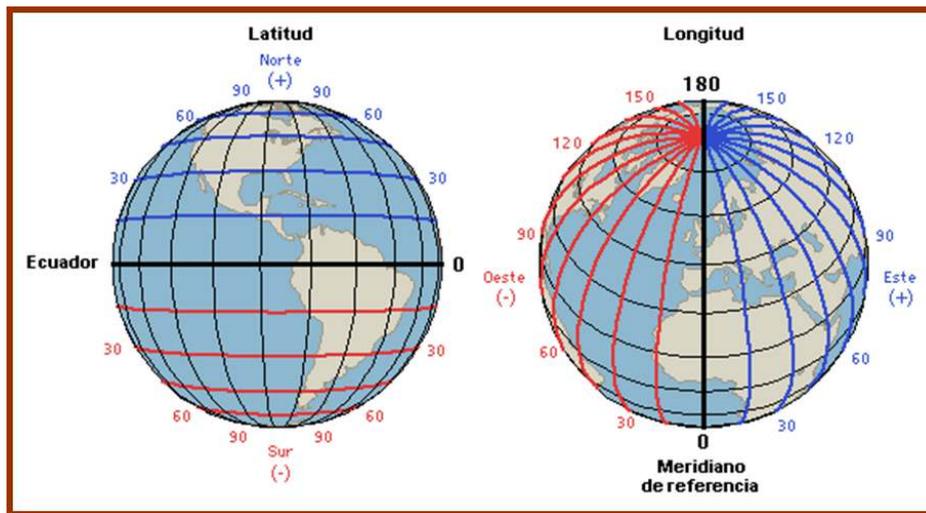


Figura N° 2 . Sistema de coordenadas geográficas.

### 3.2. Proyección cartográfica

La proyección cartográfica que se utilizará es la **Universal Transversal de Mercator (UTM)**; en la cual, la tierra es dividida en 60 zonas longitudinales denominadas husos, de 6° de longitud de ancho cada una. Partiendo desde el meridiano 180° y numerándose crecientemente hacia el este, permite una representación plana sustentada en un eje de coordenadas cartesianas que utiliza el sistema métrico decimal como unidad de medida, facilitando la obtención de medidas directamente en un plano impreso. La LATITUD es representada por coordenadas denominada norte (eje y) y la LONGITUD por coordenadas este (eje x). El territorio peruano se presenta en las zonas 17, 18 y 19 (Tabla N° 3 y Figura N° 3).

Tabla N° 3. Zonas de coordenadas UTM en el Perú.

Zona	Límite de zona		Meridiano Central
	Inicio	Final	
17	84° W	78° W	81° W
18	78° W	72° W	75° W
19	72° W	66° W	69° W

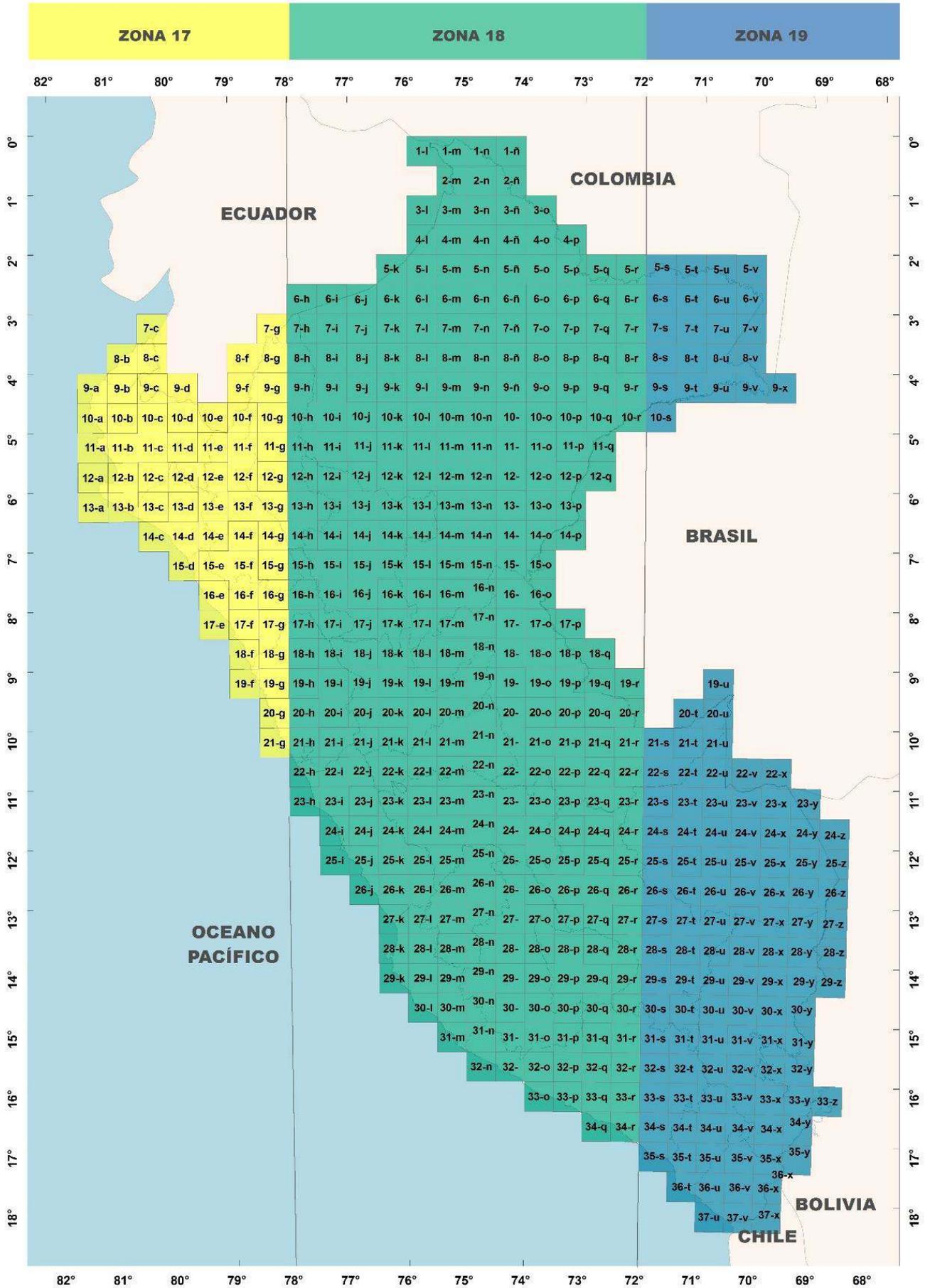


Figura N° 3 .Zonas UTM para el Perú.

## **IV. RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL**







Se debe realizar la recopilación y adquisición de la información cartográfica básica y satelital de las siguientes fuentes:

- Adquisición de imágenes satelitales del Sentinel-2 (resolución espacial de 10 y 20 m), Spot, Áster y/o equivalentes, con múltiples bandas espectrales para desarrollar el inventario; las cuales deben cumplir con los siguientes criterios: fecha de toma (entre los meses de mayo y setiembre), porcentaje de nubosidad (menor a 10%) y nieve temporal (escasa o nula). Descarga Gratuita.
- Adquisición de imágenes de los satélites Aster, Landsat, Resourcesat, Rapideye y otros para la evaluación y análisis multitemporal, con resolución espacial mayor o igual a 30 m de acuerdo con el requerimiento del inventario.
- Adquisición de modelos digitales de elevación del sensor ALOS-PALSAR de resolución espacial de 12.5 m o equivalente para realizar el inventario. Descarga Gratuita.
- Adquisición de MDE de 30 m, en caso lo amerite, para adecuar y mejorar los errores o completar la falta de datos del MDE ALOS-PALSAR.

La información requerida y disponible, debe ser proveniente de fuentes oficiales (Tabla N° 4).

**Tabla N° 4. Disponibilidad de información existente.**

Información	Tipo	Fuente	Descripción	Disponible
Cartas topográficas (Ríos, lagunas, cotas, curvas de nivel y señales).	Vectorial (base)	MINAGRI / COFOPRI / IGN	Digital (formato *.cad y *.shp) a escala 1:25,000 y 1:100,000	- Requerimiento a la institución
Limites políticos (departamento, provincia y distrito), centros poblados, cuencas hidrográficas, red vial, límites de áreas naturales protegidas, ríos principales y secundarios.	Vectorial (base)	MINAM	Digital a escala 1:100,000	- <a href="http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/">http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/</a> .
Límite de unidades hidrográficas.	Vectorial (base)	MINAGRI-ANA	Digital a escala 1:100,000.	- <a href="http://geoservidor.minam.gob.pe/geominam">http://geoservidor.minam.gob.pe/geominam</a>
Cartografía glaciar.	Vectorial/ Raster (base)	Hidrandina S.A. / MINAGRI - ANA	Digital a escala 1:100,000 entre los años 1955 y 1962.	- <a href="http://geo.ana.gob.pe/geohidrov2/">http://geo.ana.gob.pe/geohidrov2/</a> Requerimiento a la institución: • Dirección: Av. Confraternidad Internacional Oeste N° 167. Huaraz, Ancash

Cartografía glaciar.	Vectorial (base)	MINAGRI-ANA	Digital a nivel nacional a escala 1:100,000 entre los años 2003 y 2010.	- <a href="http://geo.ana.gob.pe/geohidro2/">http://geo.ana.gob.pe/geohidro2/</a>
Imágenes de satélite Landsat, ASTER, Resourcesat, CBERS y otros según requerimiento.	Raster (material satelital)	USGS NASA-Reverb ECHO GLCF INPE	Imágenes de satélite con varias bandas para la evaluación y análisis multitemporal	- <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> - <a href="https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&amp;spatial_map=satellite&amp;spatial_type=rectangle">https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&amp;spatial_map=satellite&amp;spatial_type=rectangle</a> - <a href="http://www.landcover.org/data/">http://www.landcover.org/data/</a> - <a href="http://www.dgi.inpe.br/CDSR/">http://www.dgi.inpe.br/CDSR/</a>
Imágenes de satélite Sentinel-2 o imágenes equivalentes.	Raster (material satelital)	ESA USGS	Imágenes con resolución espacial entre 10 y 20 m para el inventario	- <a href="https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home">https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home</a> - <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
Modelos digitales de elevación SRTM y Astergdem; en ambos casos últimas versiones.	Raster (material satelital)	GLCF CSI USGS	Modelos de elevación digital para mejorar o complementar las zonas con anomalías de los MDE base.	- <a href="http://www.landcover.org/data/">http://www.landcover.org/data/</a> - <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp">http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp</a> - <a href="https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/">https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/</a>
Modelo digital de elevación (base).	Raster (material satelital)	ASF	Modelo digital de elevación con resolución espacial de 12.5 m para el inventario.	- <a href="https://www.asf.alaska.edu/">https://www.asf.alaska.edu/</a>

# V. ADECUACIÓN Y GENERACIÓN DE INFORMACIÓN

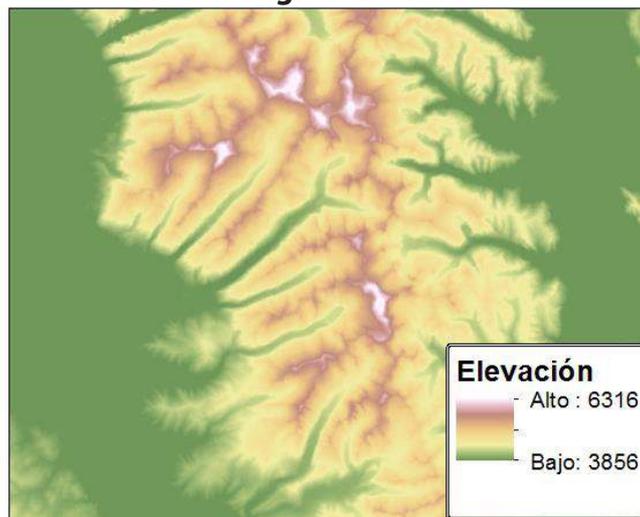




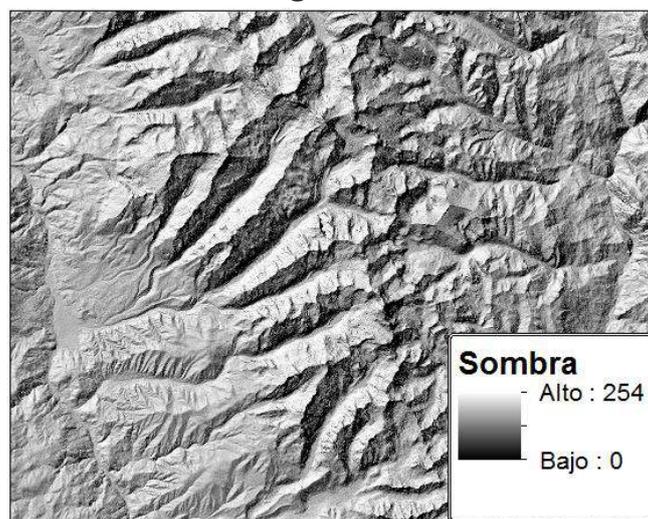
La información obtenida y adquirida pasa por un proceso de adecuación y generación, cubriendo el área de estudio, que corresponde a:

- La cartografía topográfica del IGN / MINAGRI a escala 1:25,000, es importante para la generación de los mapas base y temático de glaciares.
- En el caso de que no hubiera disponibilidad de las cartas nacionales, se ha de generar la cartografía base a través de modelos digitales de elevación (datos actuales) de 12.5 o 10 m, utilizando herramientas SIG (considerando las limitaciones para la escala de trabajo detallado). En el proceso es necesario tener en cuenta los lineamientos y recomendaciones técnicas del IGN.
- Generación del mosaico de las imágenes de satélite adquiridas.
- Generación de mosaico y derivados (Figura N° 4) de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) para el procesamiento de las imágenes de satélite y elaboración de mapas temáticos, así como la obtención de datos para los parámetros requeridos en el inventario.

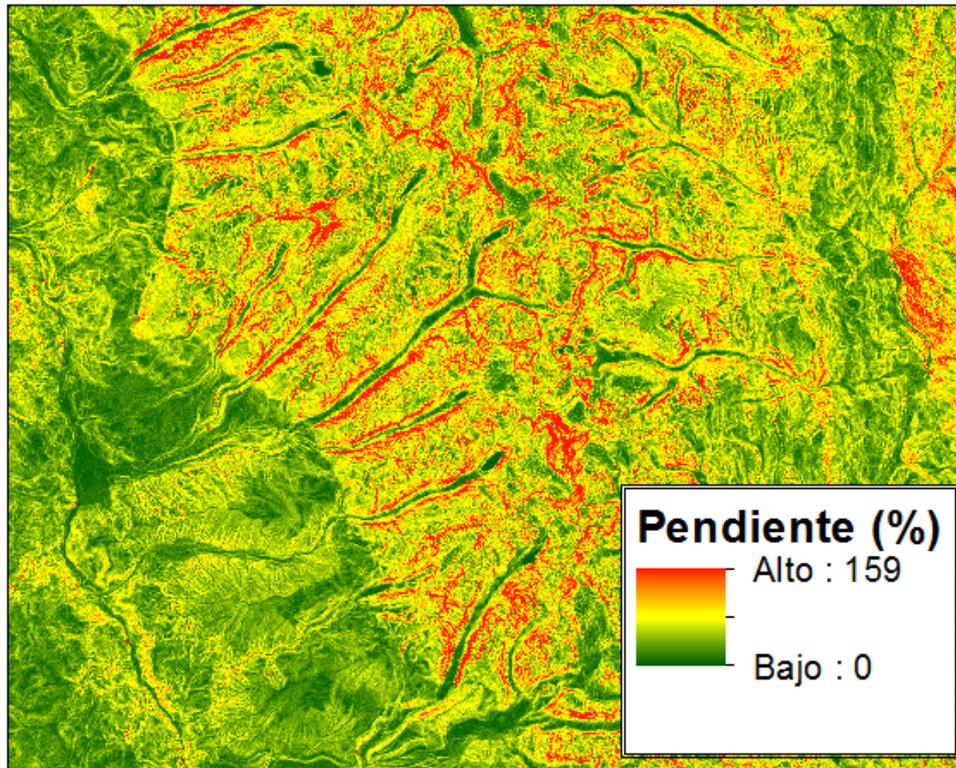
#### Modelo digital de elevación



#### Modelo digital de sombras



### Modelo digital de pendiente



### Modelo digital de orientación

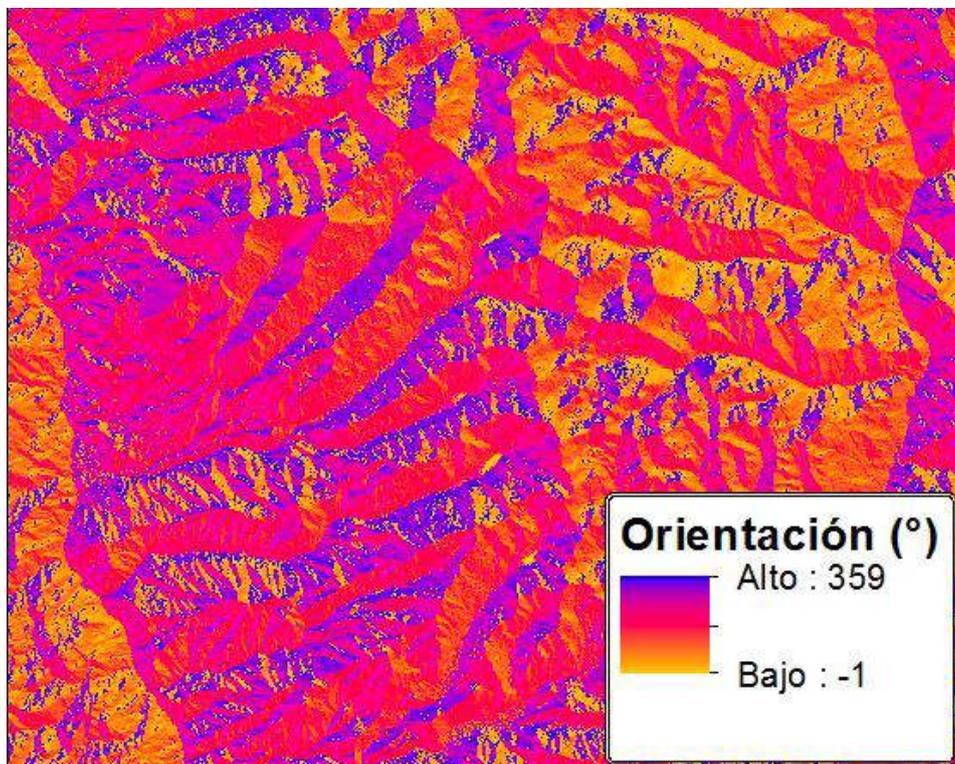


Figura N° 4 . Derivados del MDE.

## **VI. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE**







Las imágenes de satélite juegan un rol esencial en el mapeo de los glaciares. El proceso consiste en la aplicación de un conjunto de técnicas orientadas a mejorar la presentación y obtener la información adecuada de la imagen satelital, con la finalidad de facilitar la interpretación por parte del analista u operador. Este proceso es para aquellas imágenes que no tienen ningún nivel de procesamiento, por ejemplo, imágenes SPOT u otras similares.

## 6.1. Corrección geométrica

Consiste en eliminar las distorsiones de la imagen por los efectos de rotación, curvatura de la Tierra y la variación de altitud del satélite con respecto al elipsoide de referencia. Para ello, se realiza la ortorectificación, para disminuir las distorsiones por el desplazamiento, debido al relieve y las condiciones de toma del satélite, usando modelos digitales de elevación, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas. Además, se desarrolla la georreferenciación de las imágenes de satélite, en base a una cartografía oficial elegida y/o puntos de control con GPS Diferencial.

La corrección puede operarse bajo una óptica bidimensional, utilizando puntos de control en el sistema de coordenadas UTM, que son ubicados de manera homogénea en la imagen satelital a fin de lograr un ajuste con un Error Medio Cuadrático menor a un pixel (equivalente a la resolución espacial), teniendo en cuenta las características de la imagen y su nivel de precisión.

El nivel de precisión, depende de la fuente de información de referencia (cartografía oficial y puntos de GPS) y de la escala de trabajo. Se considera la ubicación de los puntos de control en lugares fácilmente reconocibles y permanentes en la escena de imagen como son: cruces de carreteras, desembocaduras de ríos, construcciones o rasgos fisiográficos, que permiten mejores resultados.

Por ejemplo, para corregir las imágenes SPOT (Figura N° 5), se tomó como información de referencia la carta topográfica (curvas de nivel y red hidrográfica) a escala 1:25,000 de COFOPRI, correspondiente al área de la subcuenca Santa Cruz.

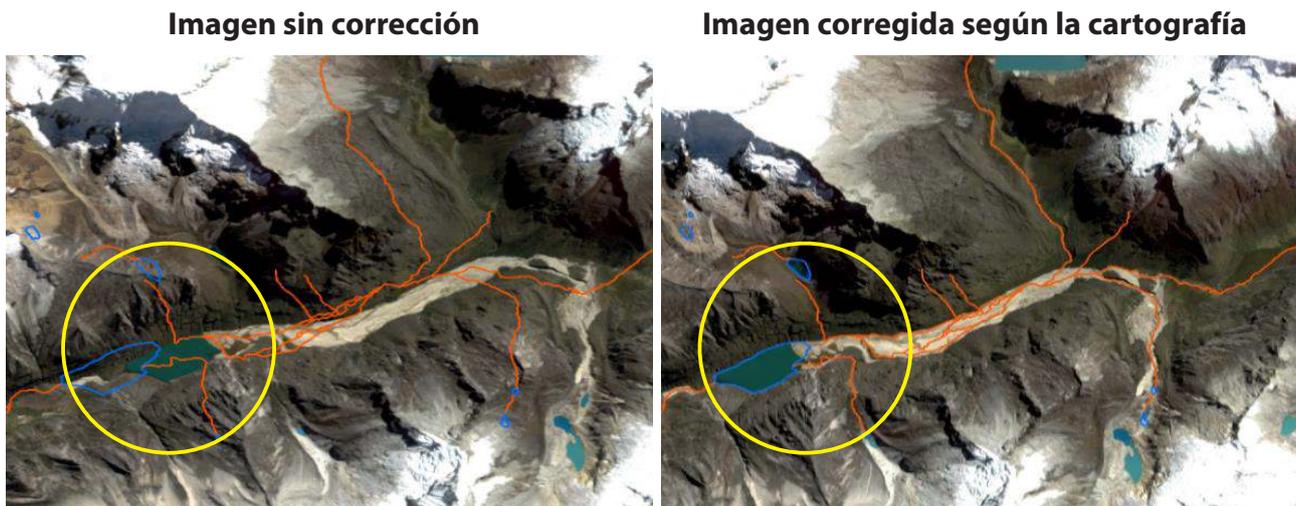


Figura N° 5 . Proceso de corrección geométrica. Caso: subcuenca Santa Cruz.

## 6.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica de las imágenes, consiste en convertir los valores digitales a valores de radiancia (Ecuación 1) y a valores de reflectancia al tope de la atmósfera. Según la ecuación 2, este procedimiento permite distinguir la cobertura del terreno al aprovechar las características espectrales corregidas de la imagen. Este proceso, considera las condiciones de captura de las imágenes de satélite como: fecha, ángulo de toma, azimut solar y fallas de origen. Los datos requeridos de entrada para este proceso se obtienen del archivo de cabecera de las imágenes de satélite.

$$L_{rad} = \frac{DN}{(GAIN+BIAS)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$L_{rad}$  : Radiancia.  
 DN : Valor digital.  
 GAIN/BIAS : Coeficientes de calibración por banda espectral.

$$P_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \text{Cos}\theta_s} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$P_{\lambda}$  : Reflectancia.  
 $L_{\lambda}$  : Valores de radiancia.  
 D : Distancia en unidades astronómicas tierra-sol.  
 $ESUN_{\lambda}$  : Irradiancia solar a nivel estratosférico.  
 $\theta_s$  : Ángulo del zenith solar.

Por otro lado, se usan imágenes de satélite de acceso libre como Sentinel-2 nivel 1C (L1C) o similares, las cuales poseen corrección geométrica y radiométrica (reflectancia al tope de la atmósfera), para mayor información consultar el documento handbook<sup>1</sup>. Estas imágenes pasan por un proceso de homogenización de la resolución espacial en sus bandas espectrales (Tabla N° 5). Para la aplicación del NDSI - Índice Normalizado, Diferenciado de Nieve (mapeo de glaciares), se utiliza la banda del infrarrojo de onda corta correspondiente a la banda 11, cuya resolución se incrementa de 20 a 10 m y se homogeniza con las bandas del visible (bandas 2, 3 y 4) e infrarrojo cercano (banda 8), uniformizando a la resolución espacial de 10 m.

**Tabla N° 5. Bandas espectrales de Sentinel 2**

<b>Bandas Sentinel-2</b>													
Número de banda	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	132
Longitud de onda central	443	490	560	665	705	740	783	842	865	940	1375	1610	2190
Resolución espacial	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20

<sup>1</sup> Disponible en [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)



## VII. MAPEO DE LOS GLACIARES





La obtención de la cobertura glaciar se basa en el procesamiento de las imágenes de satélite, para lo cual se define la escala de trabajo e interpretación de tales imágenes, así como el Área Mínima Cartografiada (AMC) de interpretación y mapeo definido en la Tabla N° 6. Los valores establecidos se usan para estandarizar y compatibilizar la información con los mapas de glaciares de cualquier zona del país que se tenga bajo las mismas condiciones, a excepción de casos particulares que amerita aumentar la escala de mapeo o disminuir el AMC del mapeo.

El AMC se define teniendo en cuenta: área identificable en la imagen de satélite según su resolución espacial y área identificada con condiciones mínimas según las observaciones de campo en montañas tropicales.

**Tabla N° 6.** Definición de escala y AMC de mapeo.

Escala de la carta	Escala de mapeo	Resolución espacial de la imagen de satélite	AMC (km <sup>2</sup> )
≥ 1:25,000	≥ 1:25,000	≤ 10 o 20 m	0.005

## 7.1. Glaciar blanco

Para la obtención de la cobertura glaciar, a través de la teledetección, es importante entender las firmas espectrales que caracterizan y reflejan una cobertura terrestre según las regiones del espectro electromagnético.

A partir de las imágenes de satélite corregidas, se realiza el mapeo de la cobertura glaciar mediante el siguiente método:

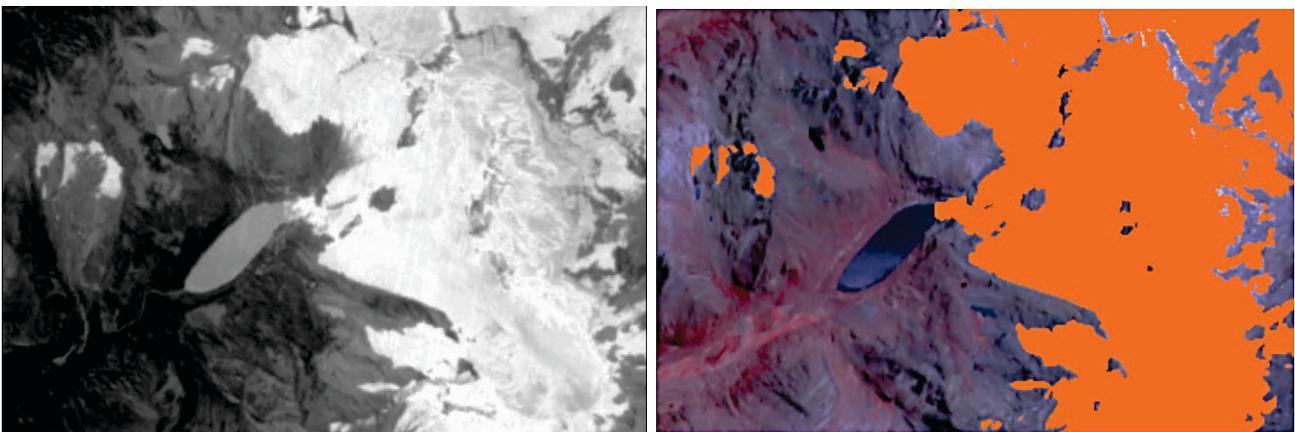
### 7.1.1. Índice Normalizado de Diferenciación de Nieve

La propiedad espectral del glaciar es que tiene una alta reflectancia en el espectro visible (verde) y muy baja en el infrarrojo medio o infrarrojo de onda corta. Esto permite usar datos de las imágenes de varias bandas (multiespectrales). En el caso particular de la obtención y análisis de la cobertura glaciar se aplica el Normalized Difference Snow Index (NDSI) (Dosier, 1989; Burns & Nolin, 2014) según la ecuación 3. Este algoritmo, se elige por ser robusto y fácil de emplear (Racoviteanu et al., 2008) y es menos sensible a las variaciones del albedo a diferencia del uso de ratios de bandas.

$$NDSI = \frac{Banda_{Visible} - Banda_{Infrarrojo}}{Banda_{Visible} + Banda_{Infrarrojo}} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

El resultado de la imagen NDSI con valores de -1 a 1 se segmenta, definiendo el umbral de  $NDSI \geq 0.4$  por ser óptimo, debido a que la cobertura de glaciares obtenidas con este valor se compara con imágenes de satélite de alta resolución espacial y verificación en campo, obteniendo buenos resultados de coincidencia en los frentes glaciares y los límites del contorno glaciar.

El resultado de la aplicación del umbral es una imagen binaria de zonas con glaciares y sin glaciares, la cual posibilita la extracción de la cobertura glaciar inicial en las imágenes de satélite. De este modo, la clasificación separa la cobertura glaciar de otras coberturas (Figura N° 6).



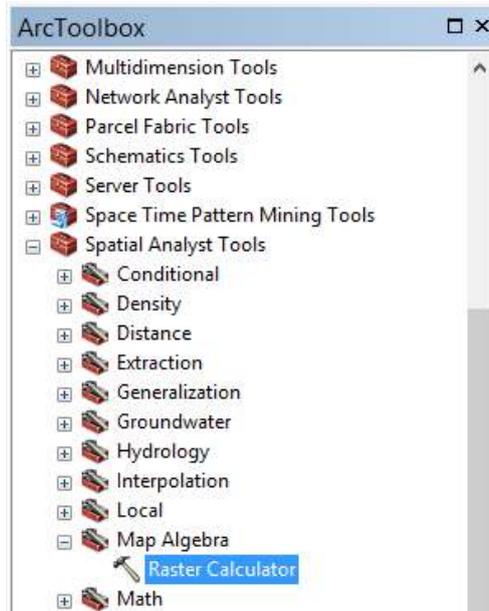
**Figura N° 6.** Obtención de cobertura glaciar en la subcuenca Pariac, el NDSI (izquierda) y clasificación (derecha) de la zona glaciar en color naranja.

Para la obtención de la cobertura glaciar a través de NDSI, se utilizará como ejemplo la imagen de satélite Sentinel-2, considerando las bandas del visible (banda 3) e infrarrojo de onda corta (banda 11, remuestreada a 10 m de resolución espacial), teniendo en cuenta que este proceso es aplicable para aquellas imágenes de satélite que presentan las bandas del visible e infrarrojo de onda corta.

A través del uso de herramientas del ArcMap del ArcGis se realiza los siguientes pasos:

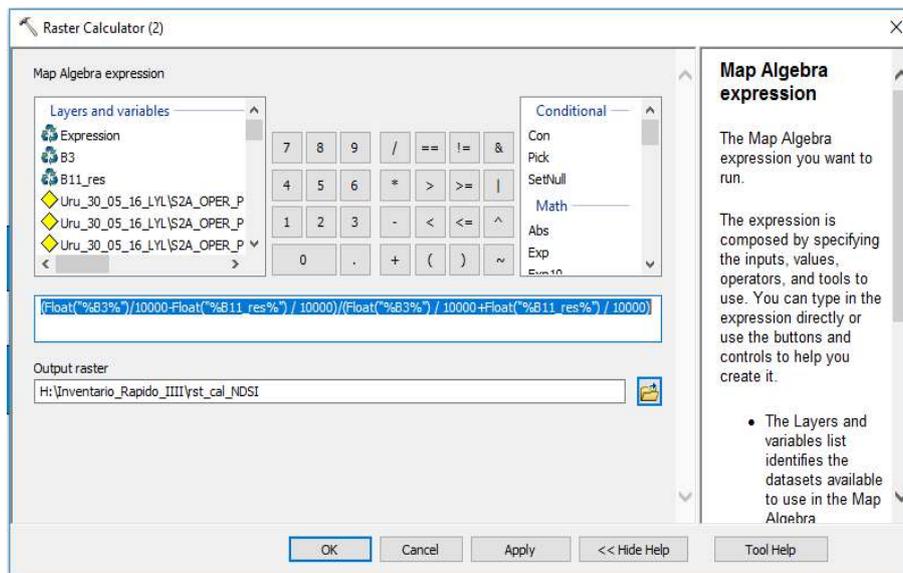
- a) Se abre el ArcMap, luego el ArcToolbox ubicando la herramienta Spatial Analyst Tools->Raster calculator (Figura N° 7) para aplicar el NDSI empleando las bandas 3 y 11.





**Figura N° 7.** Herramienta para el cálculo del NDSI.

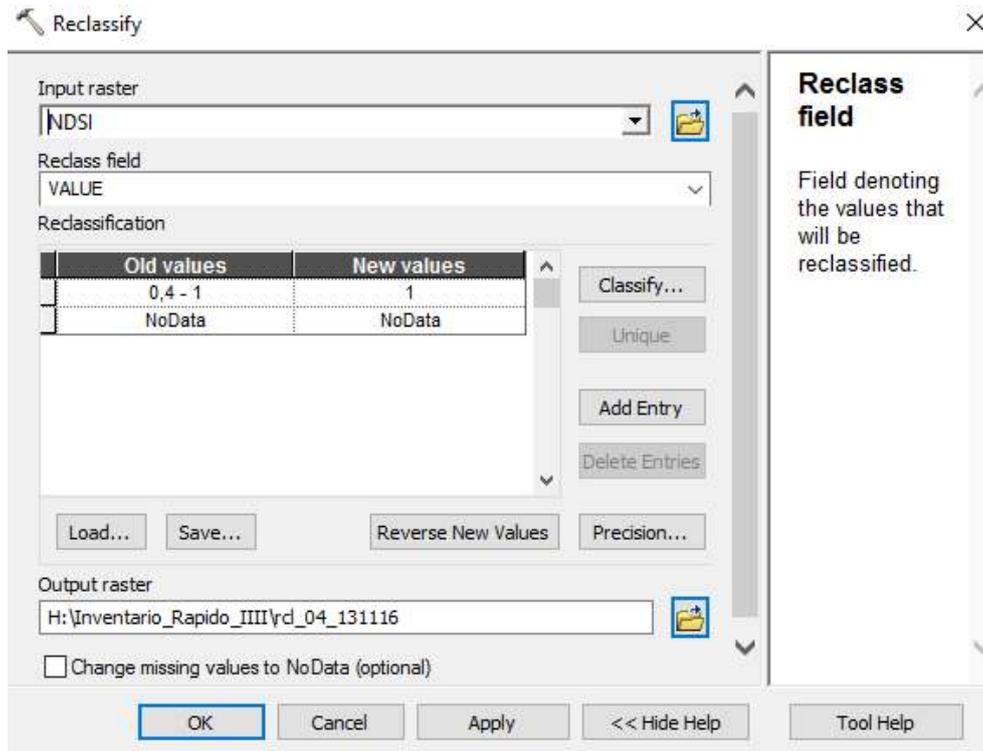
- b) En el campo Map Algebra expression se seleccionan las bandas correspondientes y en el campo en blanco se escribe la función matemática del NDSI (Figura N° 8).



**Figura N° 8.** Llenado de campos para la herramienta Raster Calculator

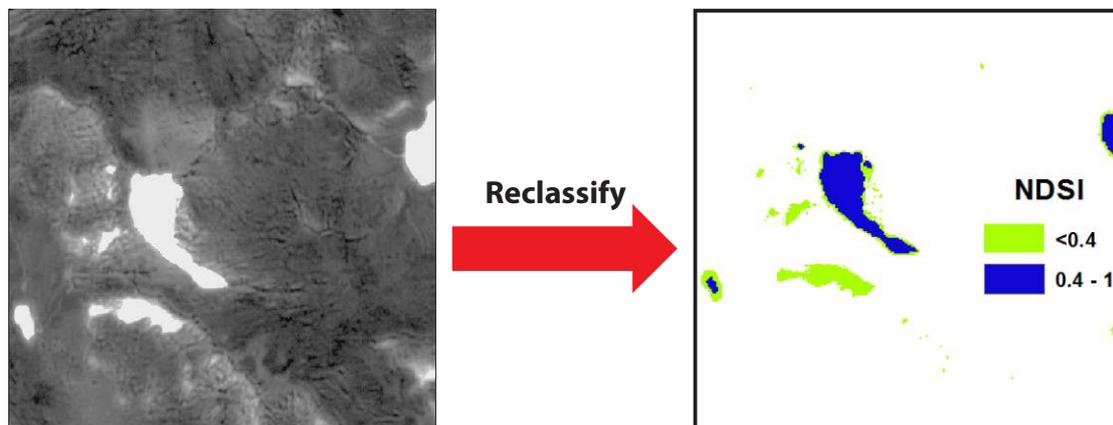
$(\text{Float}(\%B3\%)/10000-\text{Float}(\%B11\_res\%) / 10000)/(\text{Float}(\%B3\%) / 10000+\text{Float}(\%B11\_res\%) / 10000)$

- c) El resultado será un archivo raster del NDSI.
- d) Con la herramienta Reclassify, se reclasifican los valores del raster, siendo el rango de interés los umbrales entre [0.4 - 1]. En el campo Input Raster se añade el archivo de salida de la calculadora raster (Archivo raster NDSI). En el campo de reclasificación de la columna de Old values, se coloca el rango de interés [0.4 - 1] y la columna New values asignar el valor "1" que presenta el rango de los valores del NDSI requerido; finalmente se establece un nombre al archivo de salida en el campo Output raster. (Figura N° 9).



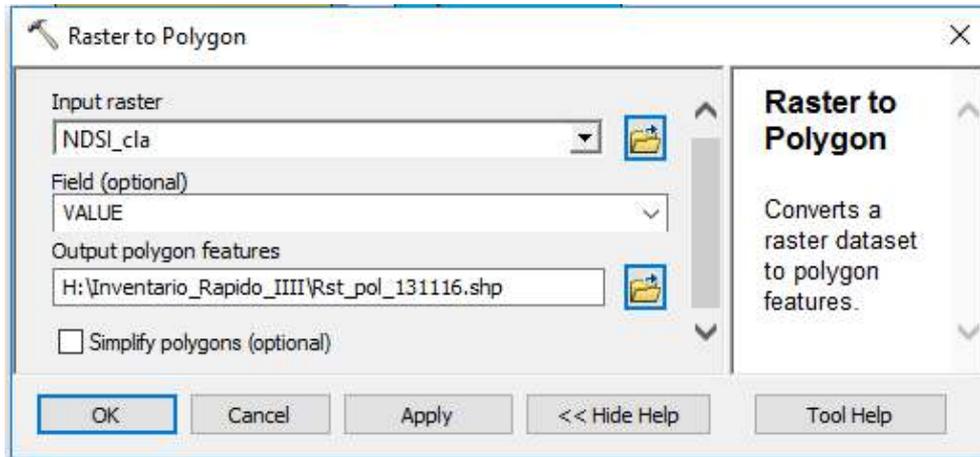
**Figura N° 9.** Datos de entrada en los campos para la herramienta Reclassify.

En el proceso de reclasificación del NDSI, se determinan los valores según la Figura N° 10.

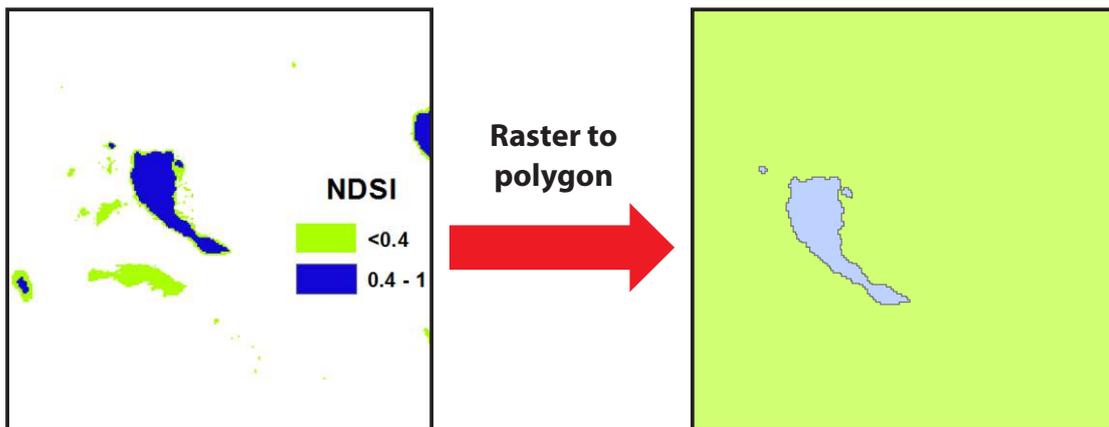


**Figura N° 10.** Raster del ND; valores de -1 a 1 (Izquierda) y reclasificación de la zona glaciar de 0.4 a 1 y zona no glaciar de <0.4 (derecha)

- e) El archivo tipo raster se convierte a uno tipo vector (polígono) con la herramienta Raster to polygon. En el campo Input Raster se añade el archivo de salida de la reclasificación y en el campo Output polygon features, se establece un nombre al archivo de salida. (Figura N° 11).

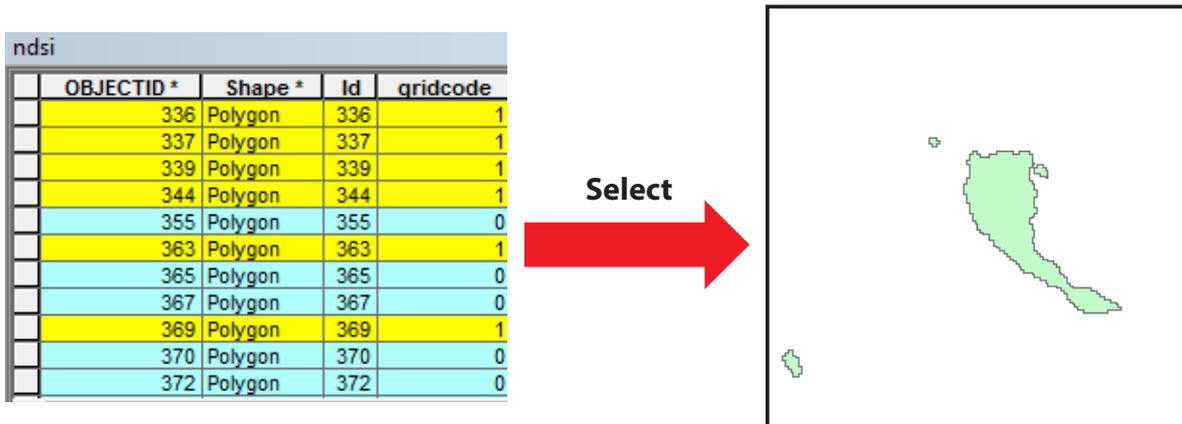


**Figura N° 11.** Llenado de campos para la herramienta Raster to Polygon.



**Figura N° 12.** Conversión del formato raster al formato shapefile tipo polígono.

- f) Al convertir el archivo raster a polígono, el programa designará automáticamente valores de cero a los polígonos cuyo gridcode correspondan a valores de NDSI menores a 0.4 y valores de 1 para los valores entre 0.4 y 1 (Figura N° 13). Como nuestro interés es obtener solo aquellos polígonos que corresponden a cobertura glaciar, se emplea la herramienta Select y se añade la función lógica condicional denominada Expresión como Query Builder>GridCode = 1 para seleccionar sólo los polígonos cuyos valores de gridcode sean igual a 1. De esta manera, se mapea la cobertura glaciar aplicando el NDSI.



**Figura N° 13.** Selección de polígonos de interés.

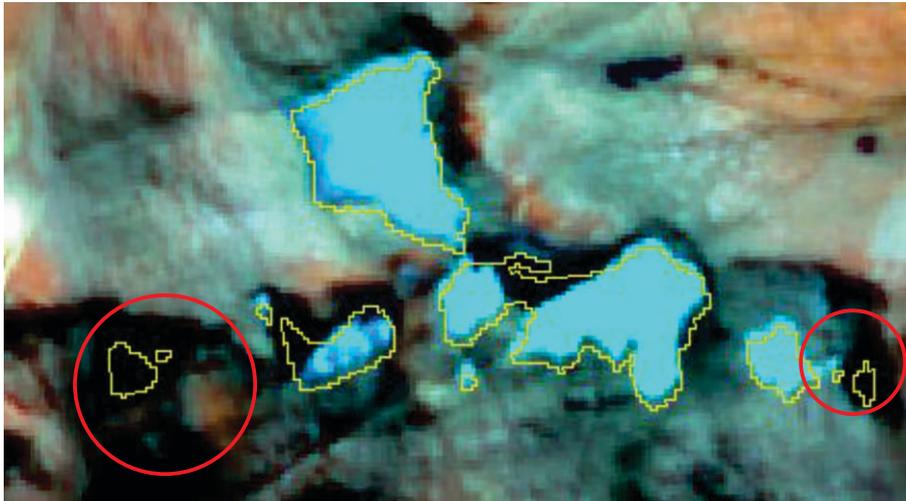
Adicionalmente, en el Anexo N° 1, se muestra un modelo de flujo de procesos para obtener automáticamente la cobertura de glaciares.

En el caso que se utilicen imágenes de satélite que no poseen las bandas del infrarrojo medio o infrarrojo de onda corta, no será posible la aplicación del algoritmo del índice estandarizado de diferenciación de nieve/hielo (NDSI). Como alternativa se emplea la clasificación supervisada empleando las herramientas del programa Envi según el manual<sup>2</sup> de procesamiento de imágenes de satélite para la identificación y delimitación de los glaciares blancos (no cubiertos). El método empleado es el de la máxima probabilidad, debido a que funciona a menudo con buenos resultados en zonas de montaña con una diferenciación espectral aceptable; considerando que las áreas de entrenamiento son esenciales (zonas de muestra de coberturas terrestres reconocidas en campo) para terrenos heterogéneos como los Andes del Perú.

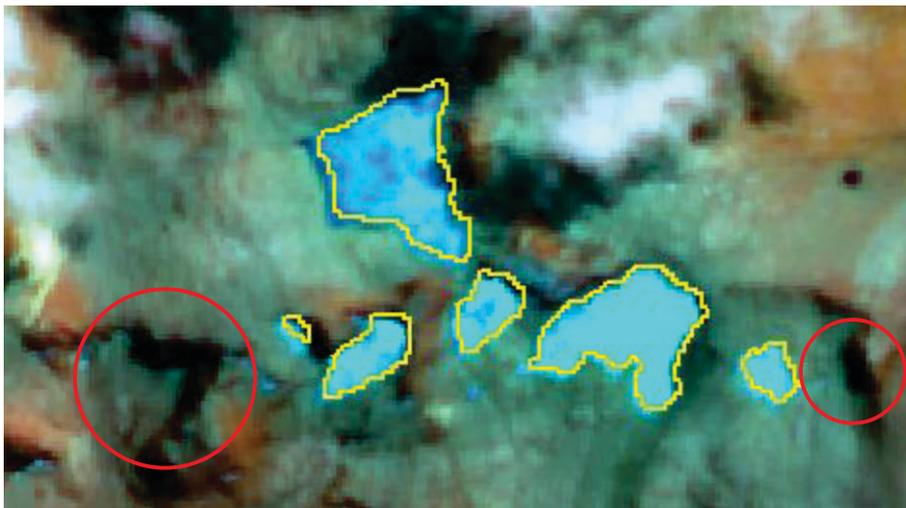
Finalmente, la cobertura glaciaria se evalúa y analiza de forma minuciosa para definir su evolución a través de imágenes satelitales tomadas en fechas anteriores, con apoyo adicional de imágenes de alta resolución del Google Earth, correspondiente a la fecha del inventario (Figura N° 14); y así evitar la delimitación de nieve temporal, tanto libre o bajo sombra y sobrestimar la cobertura glaciaria.

<sup>2</sup> [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual/bibliotecavirtual/a00171.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00171.pdf)

Cobertura glaciar de color amarillo e imagen de satélite con presencia de sombra, de fecha 30/05/2016.



Superficie glaciar depurada de color amarillo con la ayuda de la imagen de satélite, de fecha 17/09/2016.



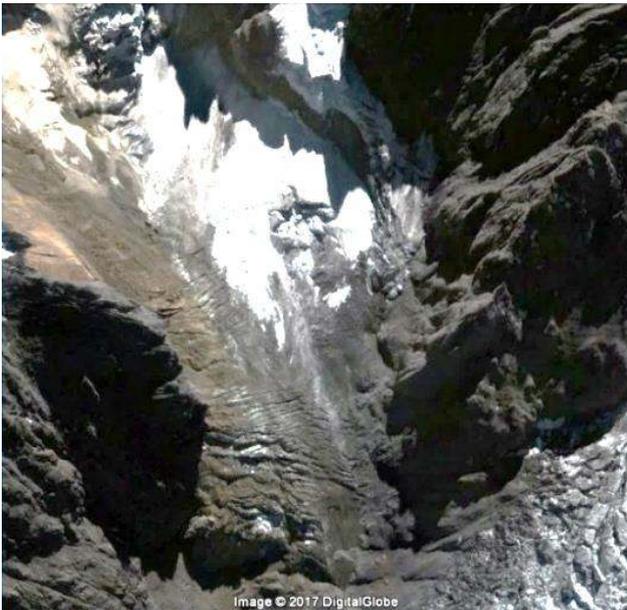
**Figura N° 14.** Análisis de la cobertura glaciar en círculos de color rojo bajo sombra.

## 7.2. Glaciar cubierto

La delimitación de los glaciares cubiertos con escombros es de mayor dificultad a través de algoritmos. Sin embargo, estas coberturas se digitalizan a mano alzada a través de la interpretación visual de las imágenes de satélite (por ejemplo, combinación de bandas: RGB = 432 - SPOT 7 y RGB = 432 - Sentinel-2). Además, con el apoyo de los modelos digitales de pendiente y sombra, es posible realizar el análisis de la morfología del paisaje en la zona glaciar, complementadas con imágenes de alta resolución espacial del Google Earth y SAS Planet. Release<sup>3</sup> (Figura N° 15) y corroboradas con las inspecciones técnicas de campo.

<sup>3</sup> Disponible en: [https://bitbucket.org/sas\\_team/sas.planet.bin/downloads/](https://bitbucket.org/sas_team/sas.planet.bin/downloads/)

## Identificación del glaciar cubierto



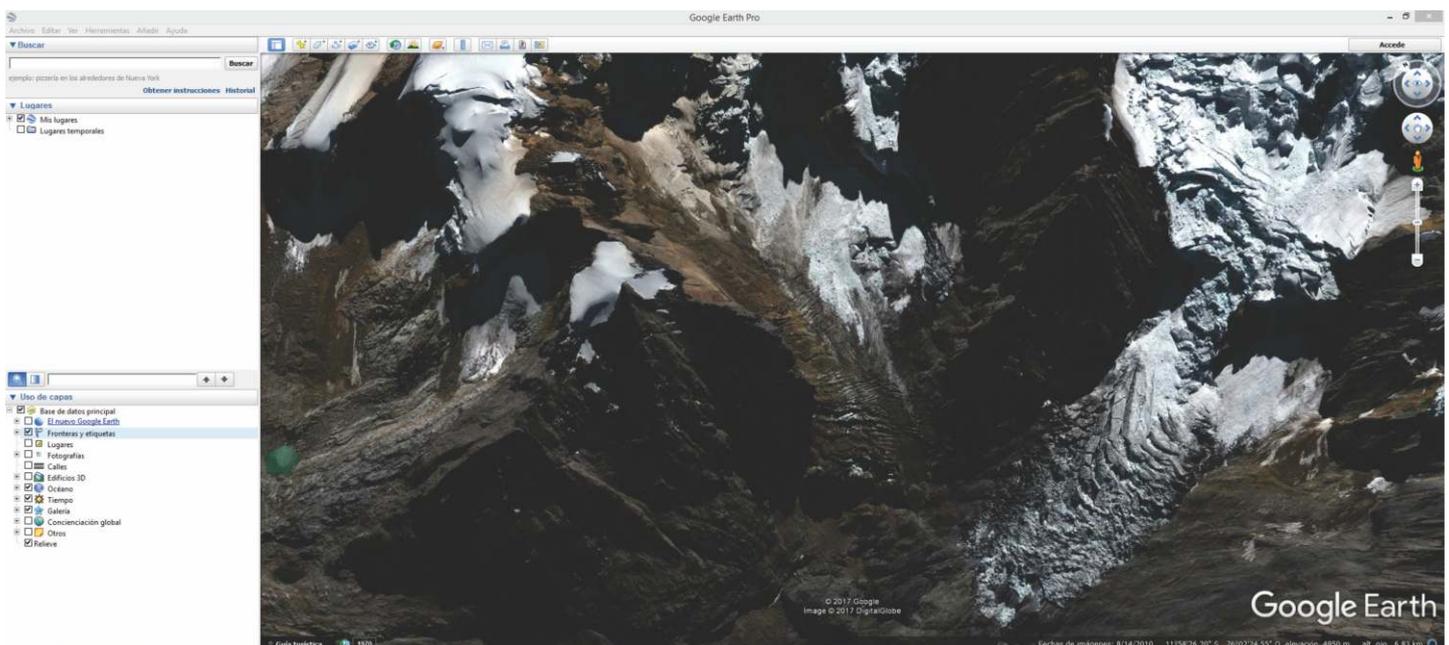
## Digitalización del glaciar cubierto



**Figura N° 15.** Interpretación y delimitación del glaciar cubierto.

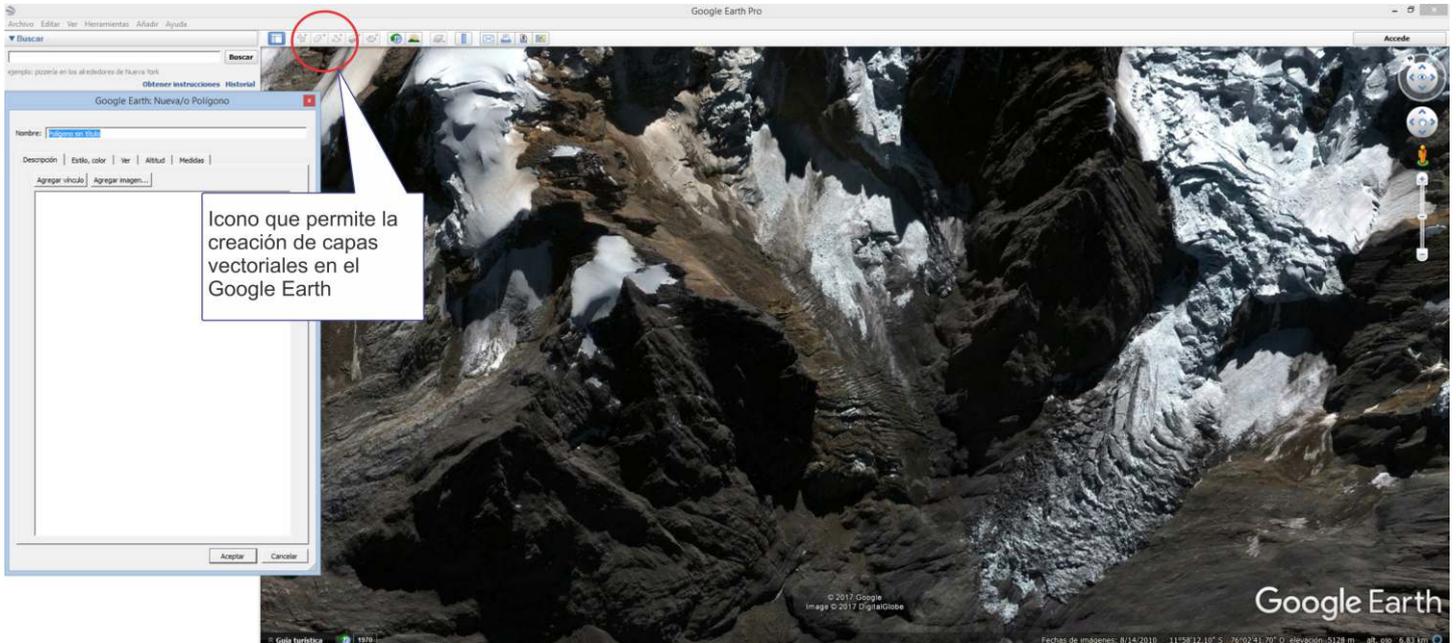
A continuación, se muestran los pasos a seguir para mapear los glaciares cubiertos:

1. Se realizará la interpretación (recorrido visual y detallado) a través de las imágenes de alta resolución del Google Earth en 3D, sobre los ámbitos de la cobertura glaciar con énfasis en las zonas bajas (Figura N° 16), donde se visualice un marcado retroceso glaciar, considerando las características del retroceso por el depósito de escombros y presencia de pequeños cuerpos de agua. Además, se observa la tonalidad de colores y textura de la superficie del terreno.

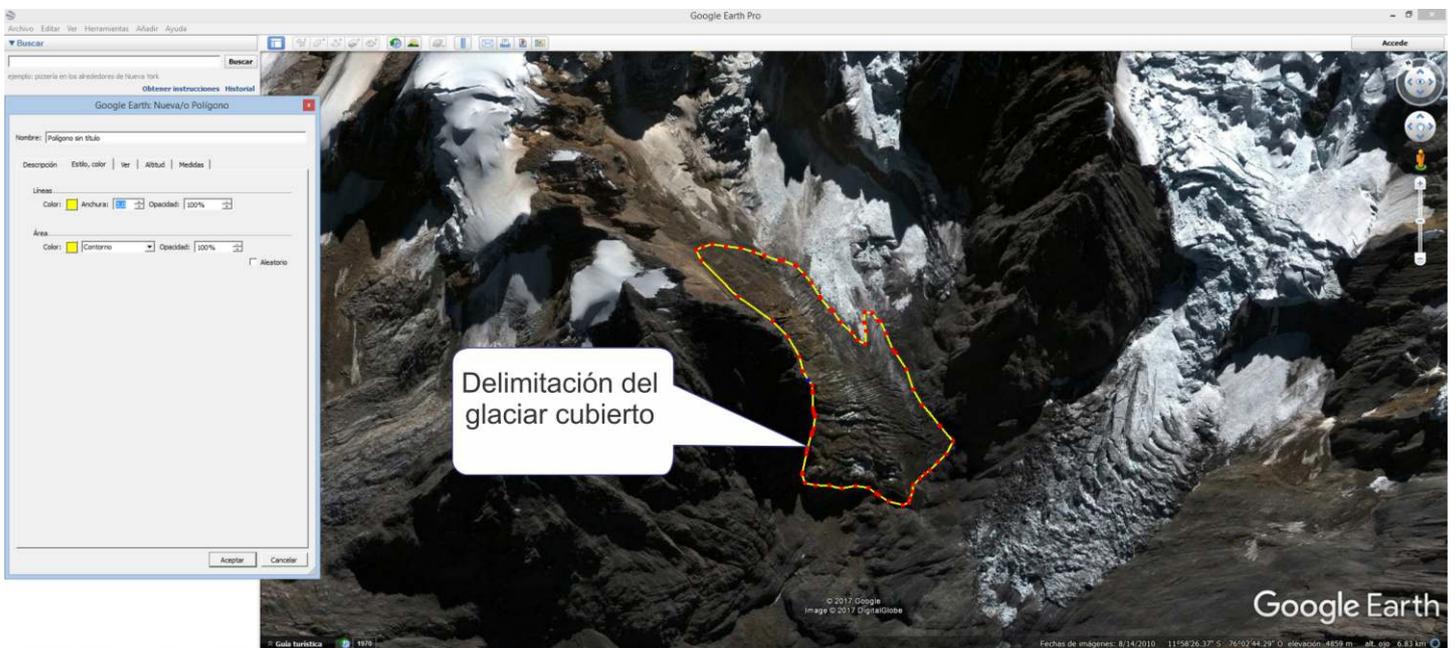


**Figura N° 16.** Visualización de superficies de glaciar cubierto a través de la imagen Google Earth.

- Después de identificar la existencia de glaciares cubiertos, crear capas vectoriales a través de las herramientas que ofrece el Google Earth (Figura N° 17) y luego se digitaliza de manera sistemática polígonos que definen los límites de los glaciares (Figura N° 18).



**Figura N° 17.** Generación de polígono que define la superficie de hielo cubierto.



**Figura N° 18.** Digitalización de la superficie de cobertura glaciar.

- Habiéndose definido y obtenido las superficies de glaciares cubiertos, se guarda la información generada. Google Earth guarda la cobertura glaciar en formato kml (Figura N° 19), la cual puede ser importada al ArcGis e incorporada a una base de datos vectorial. Archivo/Guardar lugar como/Nombre de salida/Ok.

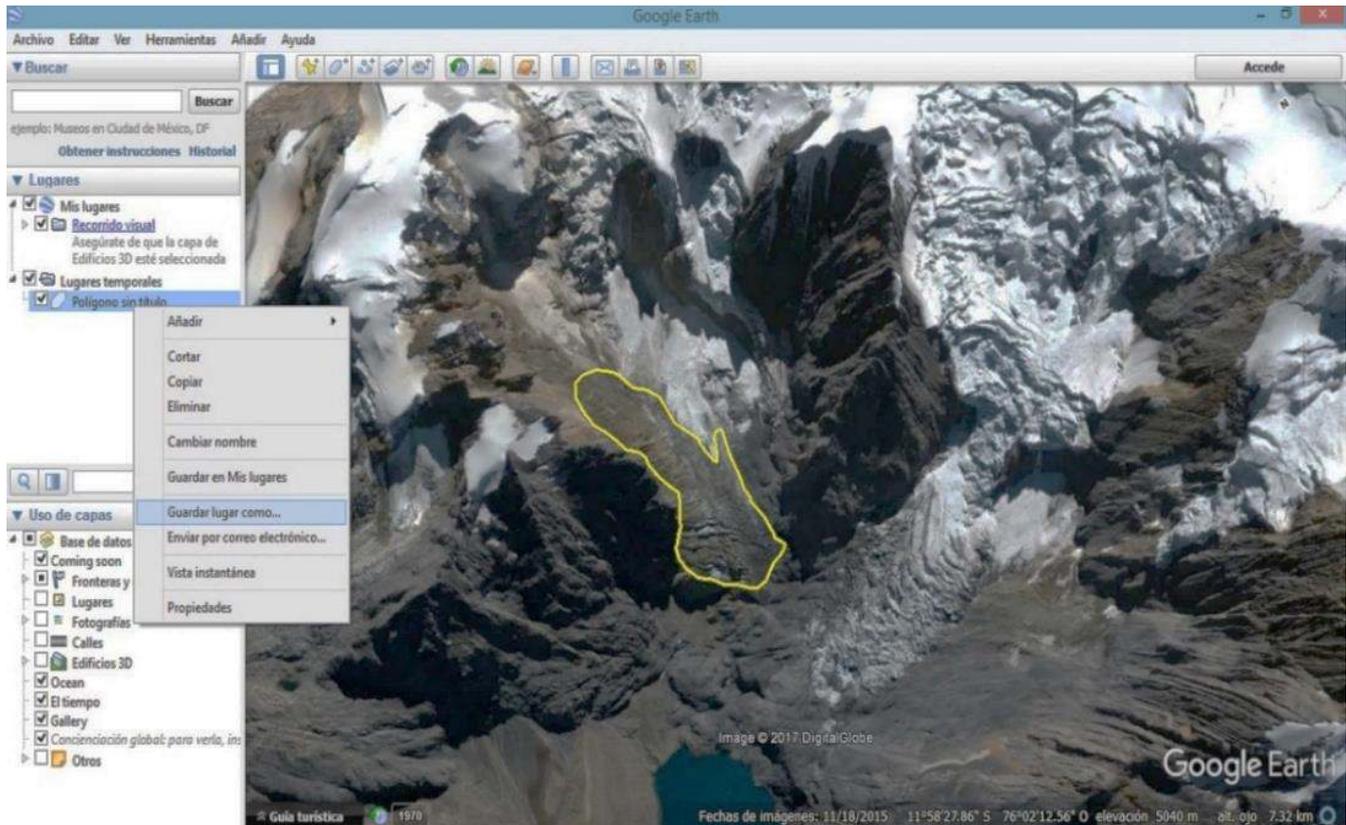


Figura N° 19. Polígono guardado en formato kml.

4. Una vez guardada la capa vectorial kml se convierte a formato Shapefile (\*.Shp) mediante el uso de la herramientas del ArcToolbox del programa Arcgis. La herramienta corresponde a la conversión Tools ->From kml ->kml to layer (Figura N° 20). De este modo, se crea y guarda la capa de polígonos en un directorio específico, la cual podrá ser incorporada a la base de datos SIG.

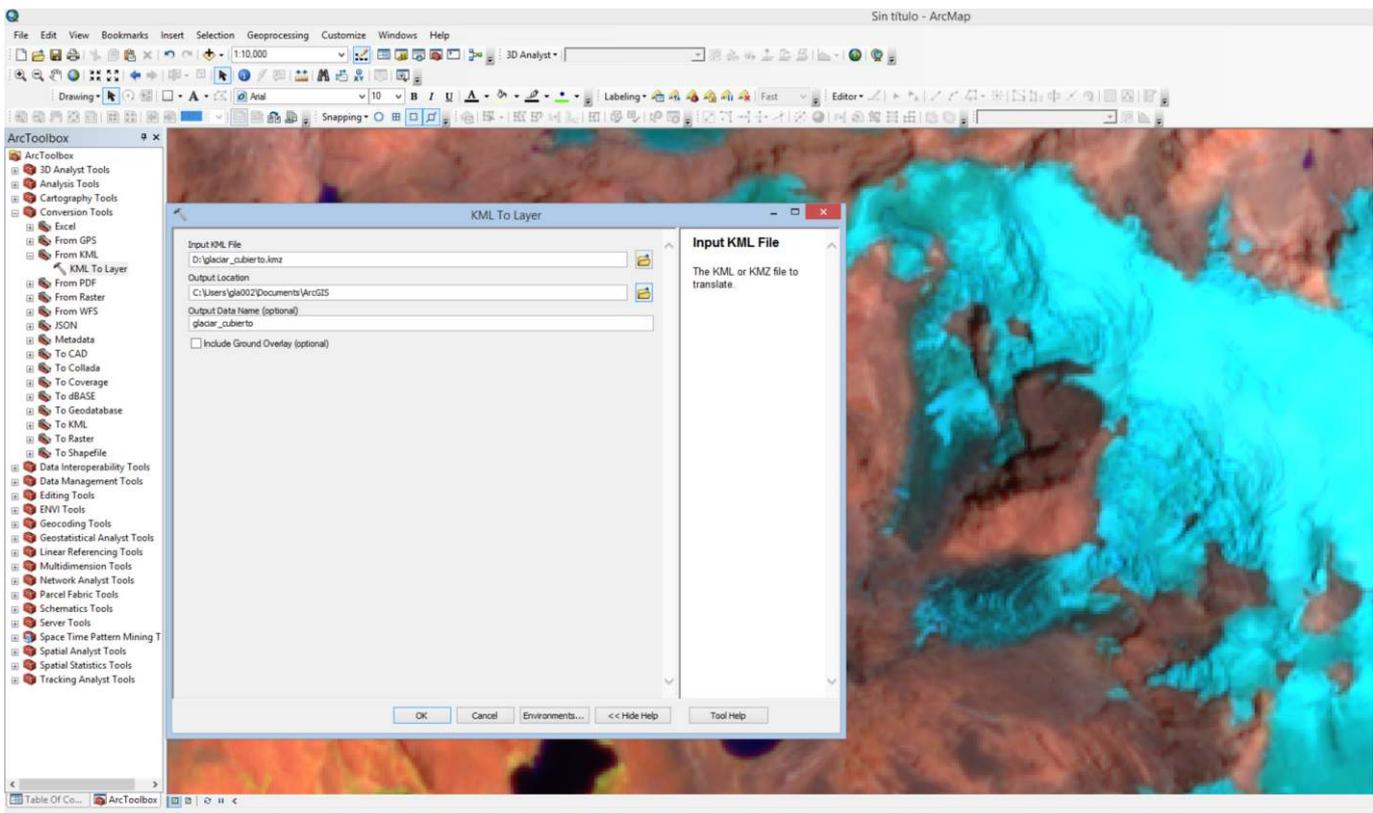
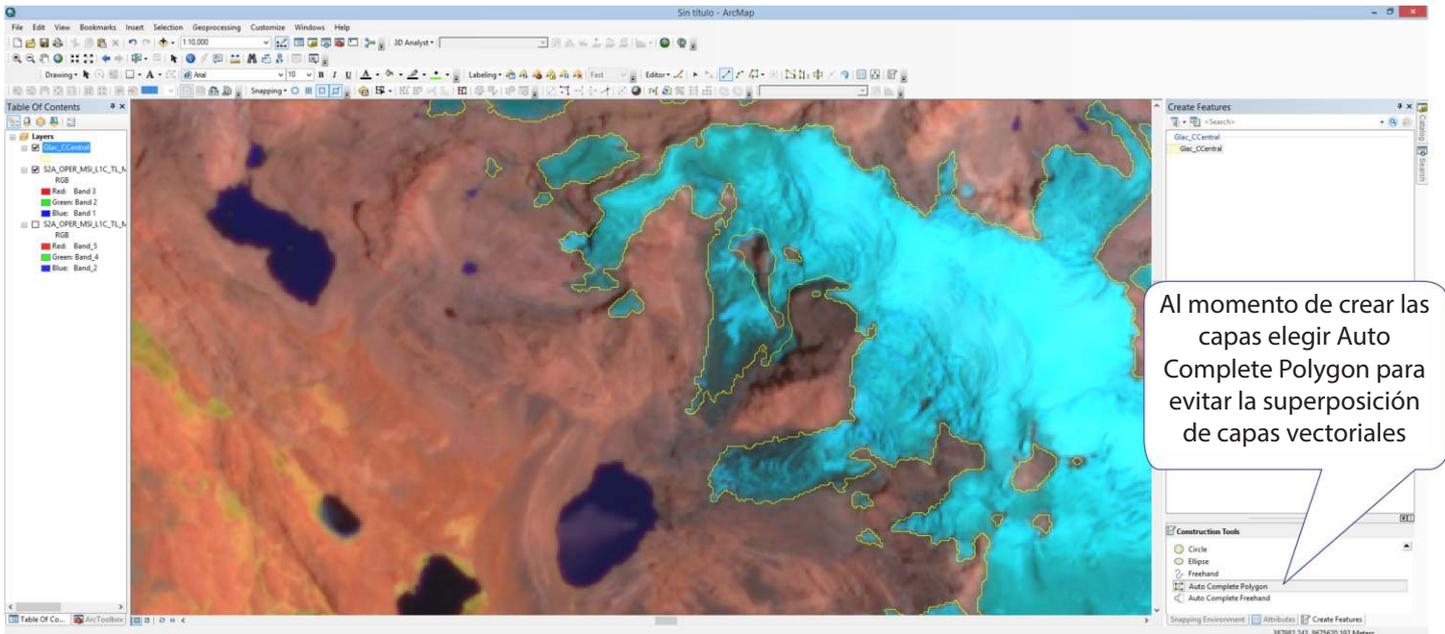


Figura N° 20. Formato kml convertido al formato de capa vectorial.

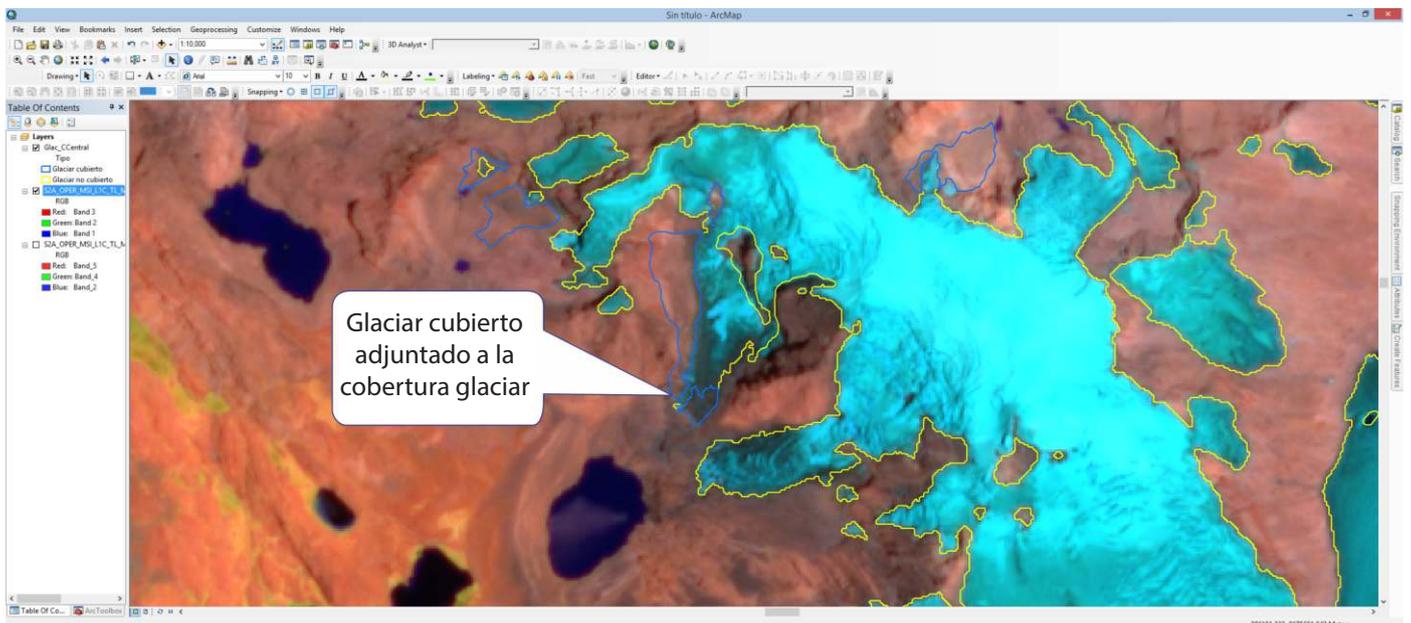


- Los polígonos guardados se abren en el proyecto SIG; donde se edita la cobertura de glaciares no cubiertos, con el propósito de digitalizar los glaciares cubiertos según los polígonos identificados en las imágenes del Google Earth. Se edita la cobertura con las herramientas del editor. Luego se ejecuta Start Editing / Create Features / Auto Complete Polygon (Figura N° 21).



**Figura N° 21.** Visualización de la cobertura de glaciares no cubiertos en la imagen Sentinel 2 RGB: 432.

- Este proceso se realiza para incorporar los glaciares cubiertos a la cobertura de glaciares no cubiertos; debido a que se encuentran contiguos unos a otros, se debe evitar que se superpongan los polígonos entre ellos (Figura N° 22). Finalmente se obtiene una cobertura de glaciares integrada de la zona de estudio.

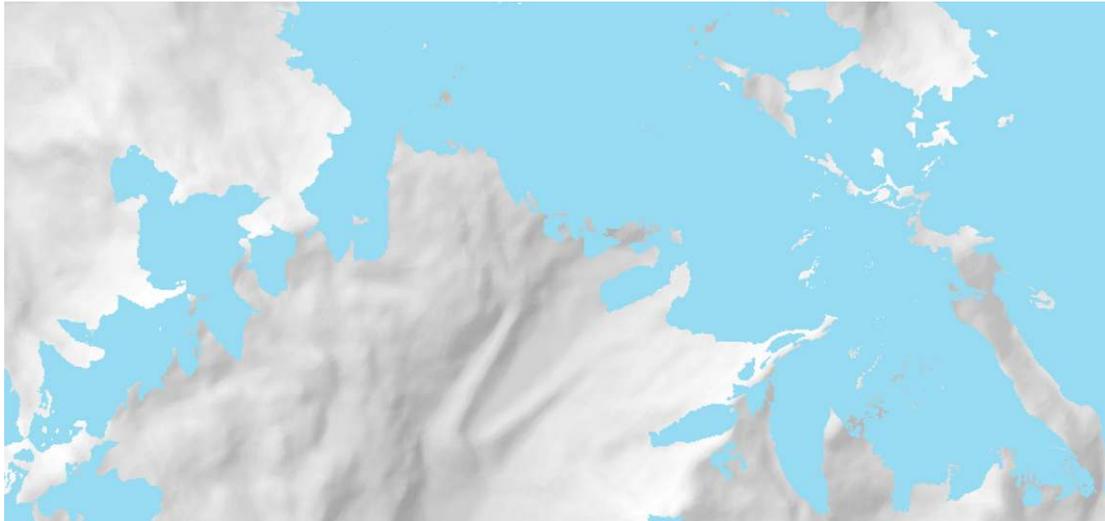


**Figura N° 22.** Edición de la cobertura de glaciares no cubiertos (límite de color amarillo) y digitalización de los glaciares cubiertos (límite de color azul).

### 7.3. Individualización de la cobertura glaciar

Este proceso consiste en determinar las unidades glaciares en base a los límites de las cuencas según el método Strahler<sup>4</sup> y la dirección del flujo glaciar (Figura N° 23). Además, se usa la cobertura de glaciares del inventario de la década de 1960 para definir las unidades glaciares.

#### Cobertura glaciar



#### Unidad de glaciar



**Figura N° 23.** Individualización de la cobertura glaciar.

Luego de definir las unidades glaciares, se revisa que los glaciares no tengan superposición con otros glaciares contiguos y se prepara la información obtenida en gabinete para la verificación y caracterización de los glaciares elegidos como muestras en las inspecciones técnicas de campo, también se realiza la caracterización complementaria del área de estudio.

<sup>4</sup> Manual disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-stream-order-works.htm>

## VIII. INSPECCIÓN TÉCNICA DE CAMPO





En caso existan dudas o zonas especiales que son difíciles de interpretar en las imágenes de satélite, se debe realizar inspecciones de campo.

Previo a la inspección de campo, se debe planificar adecuadamente con el fin de optimizar el tiempo y obtener datos confiables durante los días de trabajo. Este trabajo permite inspeccionar, contrastar y validar la información adquirida indirectamente en gabinete a partir de las imágenes de satélite, para lo cual, se deben de tener las siguientes consideraciones:

- Se realizan las coordinaciones con las autoridades y entidades involucradas en la zona de estudio para facilitar las actividades relacionadas con el inventario.
- Definición clara de los objetivos y cronograma de actividades de trabajo para obtener los datos dentro de las unidades hidrográficas en base a la información preliminar obtenida en gabinete.
- La ejecución de los trabajos de campo se debe realizar en la época de estiaje a fin de garantizar la accesibilidad y el buen tiempo en zonas altas de montaña.

Para desarrollar adecuadamente el trabajo de campo, se realizan los siguientes preparativos:

## 8.1. Requerimiento de personal

- Especialista en Glaciología-Inventario.
- Geólogo.
- Hidrólogo.
- Asistentes según la extensión de la zona de estudio.
- Porteadores-guías (según se requiera).

## 8.2. Preparación de material de trabajo

- Mapas impresos de las zonas de inspección en las coordenadas proyectadas UTM con las zonas respectivas (17, 18 y 19) con el datum WGS84 para accesibilidad y recorrido de las zonas de trabajo.
- Fichas de campos impresos para recopilar los datos y caracterización de las zonas de estudio y los glaciares (Anexo N° 2).
- Material personal básico de campo para los trabajos en zonas de alta montaña: Mochila de montaña, pantalón impermeable, casaca cortaviento, casaca térmica de pluma, lentes oscuros para nieve, zapatos para trekking, bastones para trekking, par de botas, balaclava, guantes, linterna frontal, bolsa de dormir, colchoneta y carpa para montaña.

### 8.3. Preparación de equipo de trabajo

- Cámara fotográfica.
- GPS navegador o diferencial.
- Binoculares.
- Distanciómetro.
- Radios de comunicación.

Entre las actividades que debe contener el informe de la inspección técnica son las siguientes:

- Recolección de puntos de control y rutas con el GPS para corregir y ajustar las imágenes de satélite y la cobertura glaciar.
- Verificación de la cobertura de glaciares, obtenida de las imágenes de satélite, para definir los perímetros y frentes glaciares; debido a que se presentan eventos de nieve, sombras y en contacto con lagunas.
- Verificación de la extensión de glaciares cubiertos, digitalizando los límites en base a la interpretación de las imágenes satelitales.
- Registro de fotografías de los glaciares en las zonas de inspección para tener registros de los cambios y evolución.
- Registro de la toponimia de glaciares en las zonas de inspección.
- Caracterización física en las zonas de inspección.

Después de la inspección técnica de campo, se deben incorporar las correcciones y ajustes necesarios en la cobertura glaciar y sistematización de la caracterización de los glaciares, registro de punto de control y ubicación de las zonas de muestreo y corrección de mapas temáticos. Además, actualizar la toponimia según los datos recolectados, describir e interpretar las características físicas de la zona de estudio y realizar comparaciones fotográficas acerca del cambio glaciar para el documento del Inventario de Glaciares.

# **IX. BASE DE DATOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS GLACIARES**







## 9.1. Generación de la base de datos

Para administrar y organizar adecuadamente la información generada en el inventario de glaciares es importante definir una base de datos, tanto geográfica como alfanumérica. La información gráfica muestra la geometría con una referencia espacial establecida que corresponde a la cobertura o capa vectorial (Feature Class); y la información alfanumérica muestra las características de cada entidad gráfica que se describe en una tabla de atributos, donde se especifica el tipo de dato (texto, numérico, fecha y otros) y contenido de los campos (característica según el tipo de dato).

La información geoespacial es integrada a un Sistema de Información Geográfica mediante programas informáticos como el ArcGIS. De manera secuencial se genera la base de datos, como a continuación se muestra:

- a. Se abre el ArcCatalog del ArcGIS y se crea un **Geodatabase** denominada Inventario (Figura N° 24) que es una estructura que permite la creación, almacenamiento, procesamiento y manejo de datos georreferenciados.

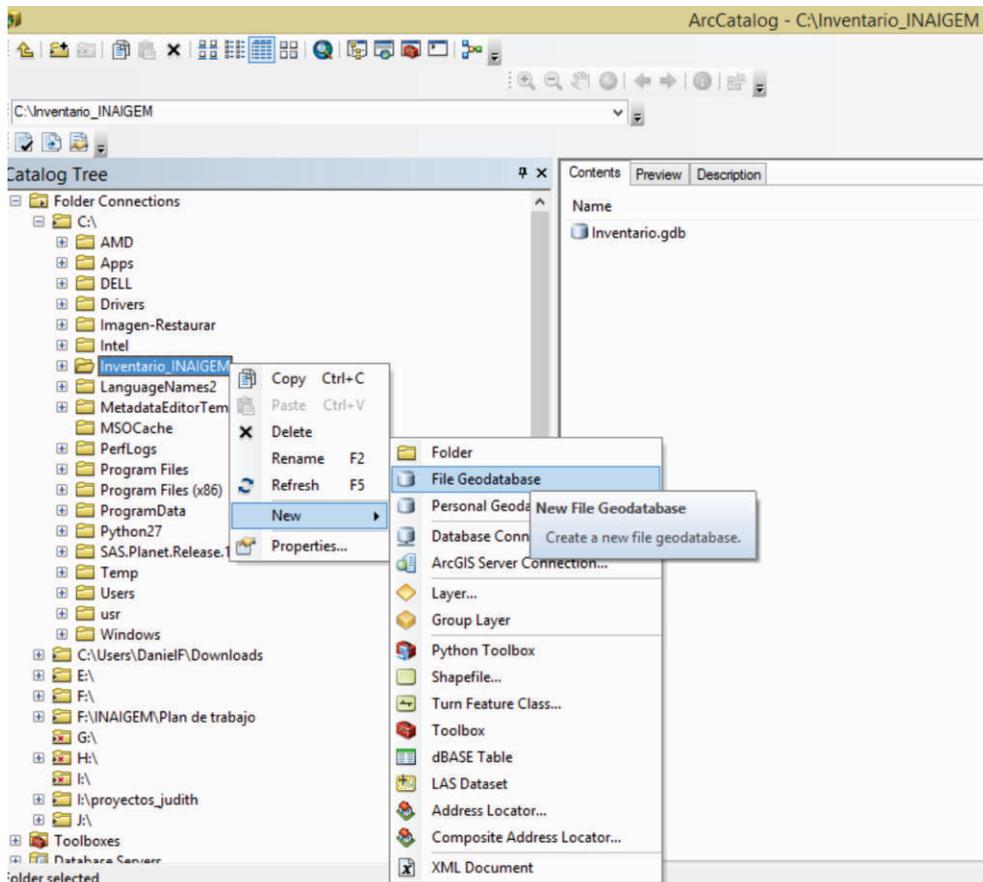


Figura N° 24. Creación de la geodatabase.

- b. Dentro del Geodatabase (Inventario) se crea una **Feature Dataset** denominado **Área de estudio** (Figura N° 25), donde se define el sistema de referencia y otras características similares que agrupan las coberturas y/o capas vectoriales.

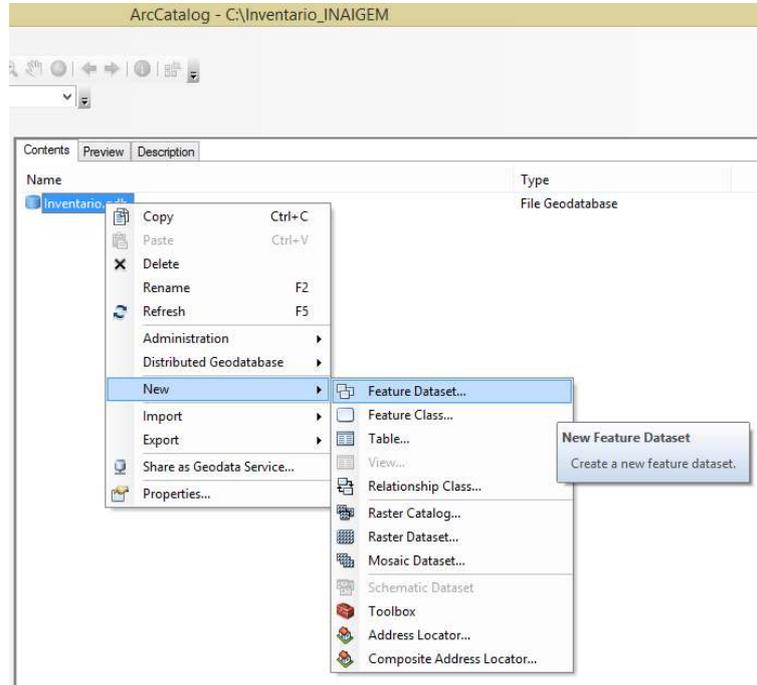


Figura N° 25. Creación del Feature Dataset.

- c. Los últimos datos determinan las coberturas que corresponden a puntos, líneas y polígonos, las cuales están denominados como Feature Class (Figura N° 26) y representan la información de las capas vectoriales referentes al inventario.

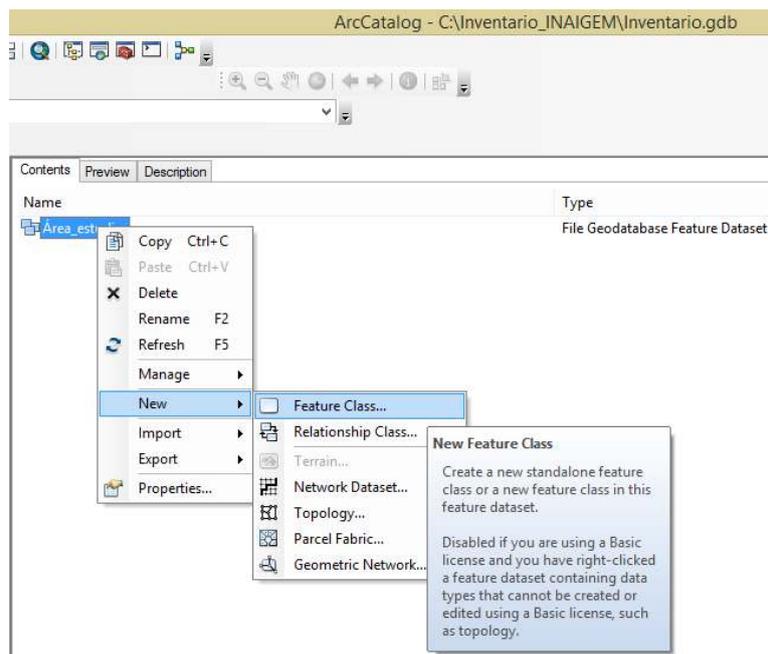


Figura N° 26. Creación del Feature Class.

- d. Como ejemplo, dentro de una carpeta principal denominada **Inventario\_INAIGEM** se recopila y genera la información para el área de estudio y se define la estructura de la base de datos (Figura N° 27).

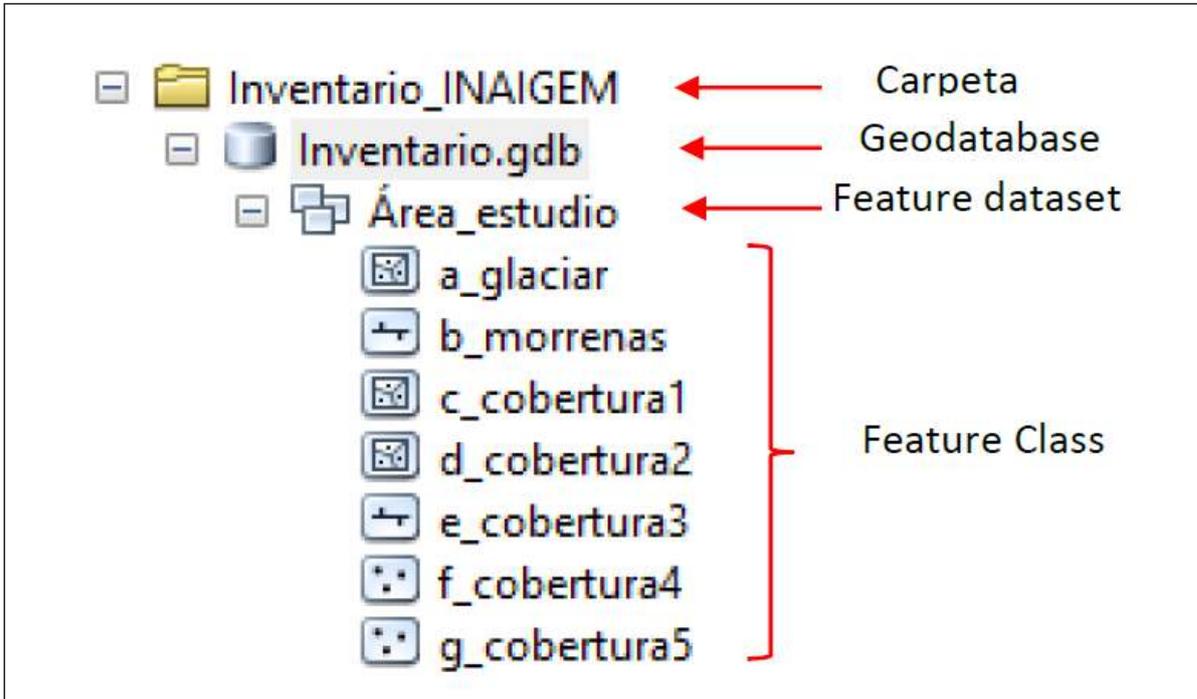


Figura N° 27. Estructura de la base de datos.

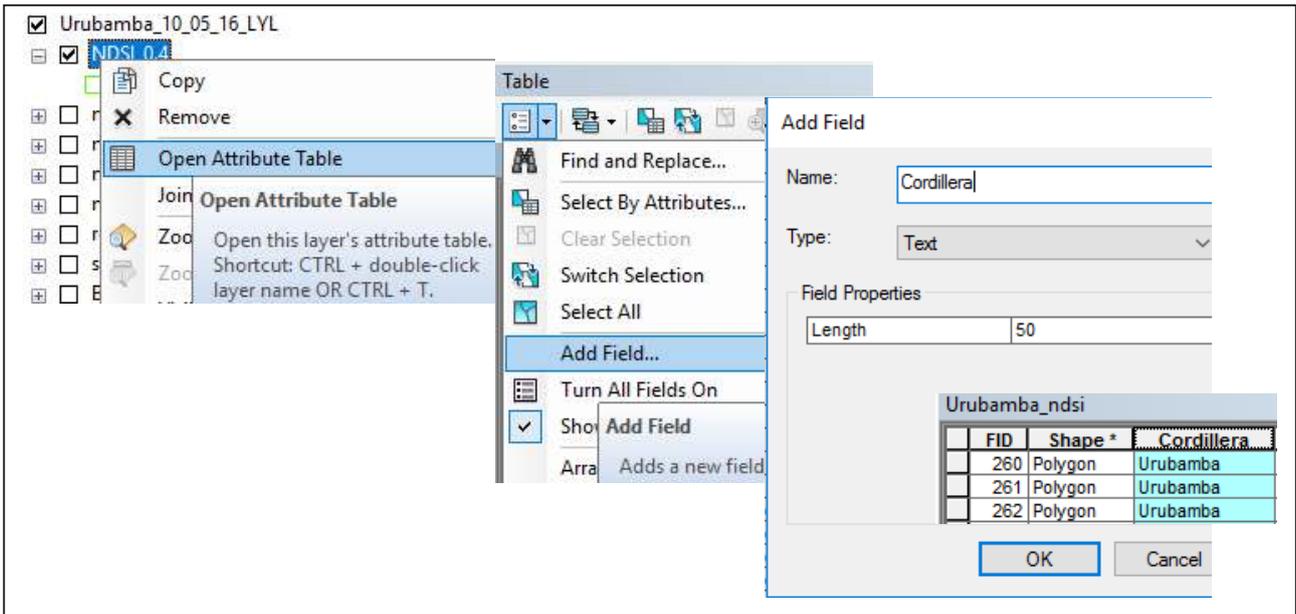
## 9.2. Características de los glaciares

Se realiza la organización de la información geoespacial (geográfica y alfanumérica), obtenida de instituciones oficiales e inspecciones técnicas de campo, que se integran en una base de datos SIG a nivel del área de estudio.

Las características a considerar son descriptivas y medibles, que se registran en el proceso del inventario con el propósito de mostrar detalles de los glaciares, los que se almacenan en una tabla de atributos en campos que se describen a continuación:

- **Nombre de la cordillera**

A cada unidad glaciar se le asigna el nombre de la cordillera en base a la capa vectorial de los límites de las cordilleras (Figura N° 28), obtenidas a partir de las curvas de nivel y la red hidrográfica donde existe influencia de los glaciares (Tabla N° 8).



**Figura N° 28.** Generación del campo y asignación del nombre de la cordillera en la tabla de atributos de la cobertura de glaciares.

• **Código nacional**

Código establecido según la codificación de cuencas por el método Pfafstetter y el número asignado al glaciar (Figura N° 29 y Tabla N° 8).



“Código Pfafstetter (nivel 7)” - “Número del glaciar”

“1376974 - 7”

**Figura N° 29.** Código nacional del glaciar.

• **Nombre del glaciar**

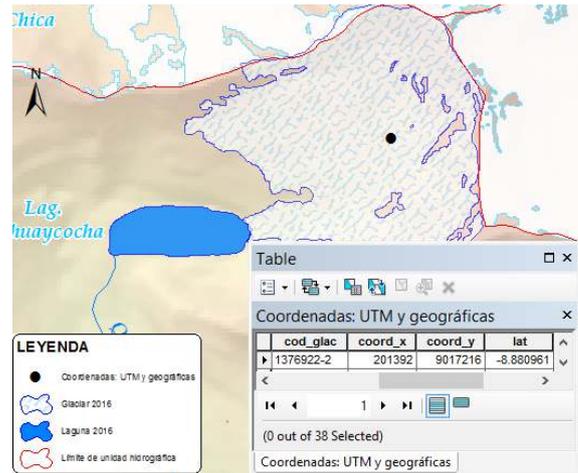
Definido de acuerdo a la toponimia registrada de documentos oficiales como cartas topográficas del IGN o local (Figura N° 30). Si no se cuenta con el nombre, se establece según la inspección de campo y otras fuentes cartográficas confiables. La ortografía del nombre debe estar según los términos locales de cada zona (Tabla N° 8).



**Figura N° 30.** Toponimia de los glaciares.

- **Coordenadas UTM y geográficas**

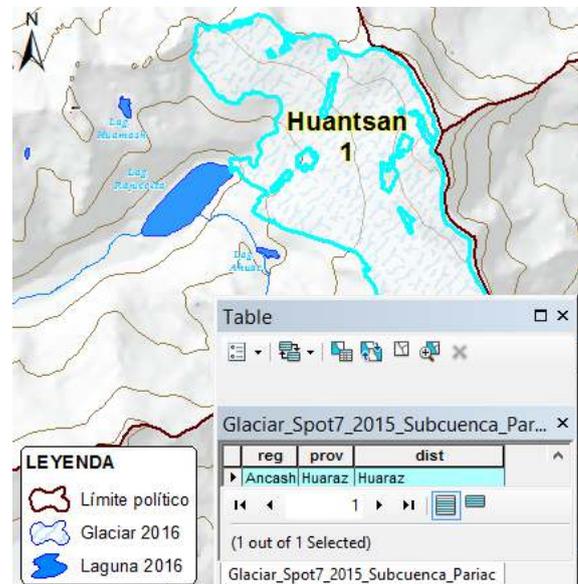
Ubica al glaciar; para este fin, se crea el centroide del glaciar (Figura N°31), a través de las herramientas SIG, obteniendo las coordenadas proyectadas (UTM en el eje x e y) y coordenadas geográficas (latitud y longitud) (Tabla N° 8).



**Figura N° 31.** Definición de coordenadas UTM y geográficas.

- **Ubicación política**

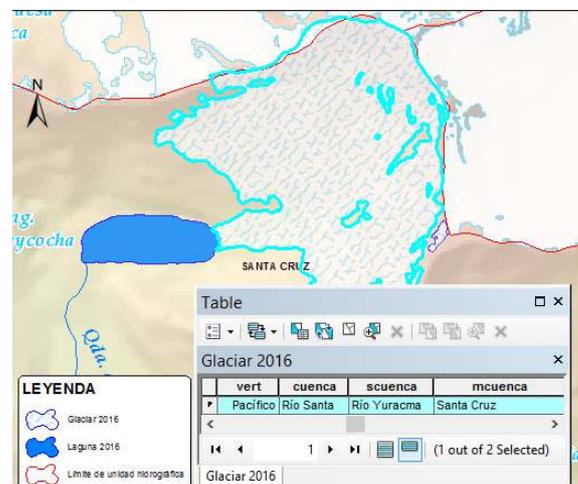
En cada glaciar se indica el código ubigeo (departamento, provincia y distrito), según lo cartografía de los límites políticos del Perú (Figura N° 32 y Tabla N° 8).



**Figura N° 32.** Toponimia de departamento, provincia y distrito.

- **Ubicación hidrográfica**

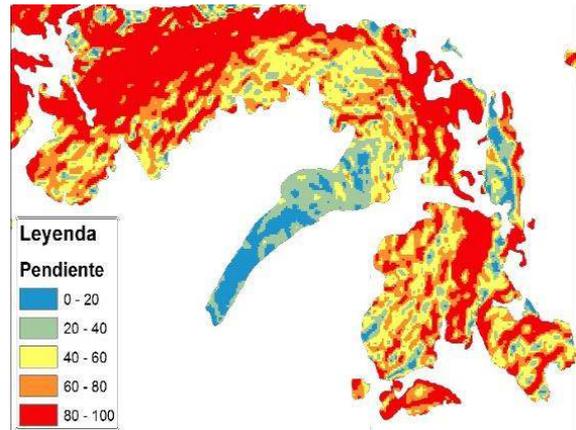
En cada glaciar se indican los nombres de cuenca, subcuenca y microcuenca según lo cartografía de los límites de las unidades hidrográficas (Figura N° 33 y Tabla N° 8).



**Figura N° 33.** Toponimia de cuenca, subcuenca y microcuenca.

- **Pendiente predominante**

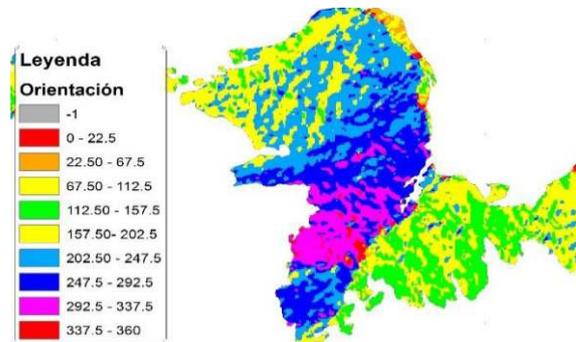
Las pendientes corresponden a valores mínimos, medios y máximos en términos de porcentaje del modelo digital de pendiente (Figura N° 34), usando el análisis estadístico; siendo la pendiente media un indicador importante en los cambios de la topografía glaciar. El cálculo de la pendiente se obtiene con la herramienta ArcGIS de "Estadística zonal" (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Zonal/Zonal Statistics as Table) (Tabla N° 8).



**Figura N° 34.** Pendiente del glaciar en %.

- **Orientación predominante**

La orientación es un parámetro obtenido a partir del modelo digital de orientación. Esta variable indica la dirección del glaciar (Figura N° 35), definido según los 8 ejes cardinales entre el rango de 0 y 360° (N, NE, E, SE, S, SO, O y NO). La orientación media se calcula con la herramienta ArcGIS de "Estadística zonal" (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Zonal/Zonal Statistics as Table).

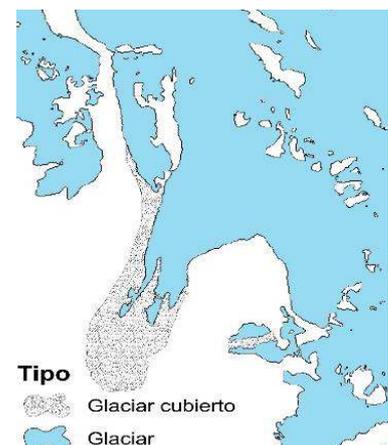


**Figura N° 35.** Orientación predominante para cada glaciar.

- **Tipo de glaciar**

Crear un campo con nombre "Tipo", en la tabla de atributos de la capa vectorial de los glaciares, después clasificar como glaciar no cubierto, glaciar cubierto y glaciar de roca (Figura N° 36 y Tabla N° 8).

Urubamba_ndsi				
FID	Shape *	Cordillera	Tipo	
322	Polygon	Urubamba	Glaciar cubierto	
323	Polygon	Urubamba	Glaciar cubierto	
293	Polygon	Urubamba	Glaciar no cubierto	
294	Polygon	Urubamba	Glaciar no cubierto	



**Figura N° 36.** Atributos (derecha) y cobertura glaciar (izquierda) con la clasificación de tipo.

- Tipo de imagen satelital**

Se asigna el nombre de imagen utilizada, en función al tipo del glaciar (Figura N° 37). Ejemplo: Glaciar no cubierto (Sentinel 2) y glaciar cubierto (Google Earth) (Tabla N° 8).

Urubamba_ndsi	
Tipo	Imagen
Glaciar cubierto	Google Earth
Glaciar cubierto	Google Earth
Glaciar no cubierto	Sentinel 2A
Glaciar no cubierto	Sentinel 2A

**Figura N° 37.** Nombre del tipo de imagen satelital.

- Código de la imagen satelital**

Se determinan los códigos a partir de los datos de cabecera de las imágenes, según los límites de las escenas que intervienen en la zona de estudio (Figura N° 38). En el caso que la cobertura glaciar se ubique entre dos escenas de imágenes satélites, considerar ambos códigos (Tabla N° 8).

Cod_Imagen
S2A_OPER_PVI_L1C_TL_MTI_20161113T193258_A007286_T19LDD
S2A_OPER_PVI_L1C_TL_MTI_20161113T193258_A007286_T19LDD
S2A_OPER_PVI_L1C_TL_SGS_20160318T232756_A003854_T19LDD/S2A_OPER_PVI_L1C_TL_MTI_20161113T193258_A007286_T19LDD
S2A_OPER_PVI_L1C_TL_SGS_20160318T232756_A003854_T19LDD/S2A_OPER_PVI_L1C_TL_MTI_20161113T193258_A007286_T19LDD

**Figura N° 38.** Adición del código de la imagen de satélite en el campo "Cod\_Imagen".

- Fecha de la imagen satelital**

Es la fecha de captura de la imagen de satélite (Figura N° 39) correspondiente al año de ejecución del inventario, que se obtiene de los datos de cabecera de la imagen de satélite (Tabla N° 8).

Urubamba_ndsi	
Fecha	
30/05/2016	
30/05/2016	
30/05/2016	
30/05/2016-03/05/2016	
30/05/2016-03/05/2016	
30/05/2016-03/05/2016	

**Figura N° 39.** Asignación de fecha de toma de la imagen del satélite en el campo "Fecha".

- **Área**

Es la extensión del glaciar, el cual es un parámetro importante para su caracterización. El cálculo es automático, usando herramientas ArcGis. El valor debe estar registrado en las unidades de m<sup>2</sup> y/o km<sup>2</sup> con 4 decimales (Tabla N° 08).

- **Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA)**

Este dato es estimado según la identificación y delimitación de la línea de nieve visible en las imágenes de satélite, hecho que permite tener una aproximación de la ELA; para ello, se aplica el análisis estadístico de los valores de altitud a partir del MDE dentro de un corredor (buffer) de 50 m (generado a partir de la línea de nieve) con las herramientas de ArcGis (Tabla N° 8).

- **Volumen**

Este parámetro mide el almacenamiento de las reservas de agua en estado sólido de cada glaciar. El volumen se calcula a partir de la estimación del **espesor promedio del flujo de hielo central** (Ecuación 4) que depende de la pendiente de la superficie glaciar, empleando datos tabulados del inventario de glaciares (longitud del glaciar según la dirección del flujo y altitud mínima y máxima) (Tabla N° 8). A continuación, se detallan las ecuaciones para estimar el volumen glaciar:

$$h_f = \frac{\tau}{f \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde,  $\tau$  es la fuerza de corte basal promedio en el flujo de hielo central;  $f$  es factor de forma (0.8);  $\rho$  es densidad del hielo (900 kg/m<sup>3</sup>);  $g$  es gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>) y  $\alpha$  es la pendiente del flujo de hielo central.

La parametrización del  $\tau$ , se realiza en función del rango de elevación ( $\Delta H$ ), basada en la reconstrucción de los glaciares alpinos del Pleistoceno tardío (Haeberli and Hoelzle, 1995).

a).  $\Delta H > 1\ 600\ \text{m}$   $\tau = 1.5\ \text{bar}$

b).  $\Delta H \leq 1\ 600\ \text{m}$   $\tau = 0,005 + 1,598\Delta H - 0,435\Delta H^2$

Finalmente, se desarrolla la interpolación del espesor del flujo central, estimando el espesor promedio (Ecuación 5) en todo el glaciar a través de la multiplicación por  $\pi/4$ , asumiendo una sección semi-elíptica y un glaciar no ramificado (Frey, et al., 2014).



$$h_F = h_f \left( \frac{\pi}{4} \right) \tag{Ecuación 5}$$

Luego se calcula el volumen del glaciar en unidades de km<sup>3</sup> (Ecuación 6)

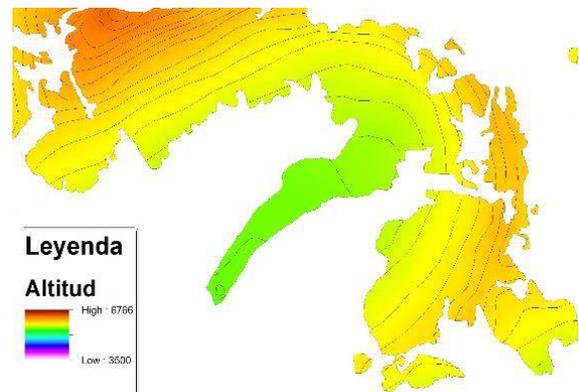
$$V_F = A (h_F) \tag{Ecuación 6}$$

Dónde: **V<sub>F</sub>**=Volumen glaciar, **A** = Área glaciar y  
**h<sub>F</sub>**=Espesor promedio de hielo.

La incertidumbre del volumen es de ±30% (Linsbauer et al., 2012), considerando la deformación y deslizamiento del glaciar.

- **Altitud (mínima, media, mediana, máxima)**

La estimación de las altitudes de los glaciares consiste en determinar la cota más baja, media y máxima del glaciar. Este parámetro se deriva del análisis estadístico de los glaciares, usando los datos del MDE y la cobertura de glaciar como zona de análisis, a través de las herramientas de ArcGIS (Figura N° 40) como “Estadística zonal” (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table). Además, es necesario considerar la altitud mediana, debido a que la *m e d i a* no siempre es representativa cuando hay mucha diferencia entre las zonas de acumulación y ablación.

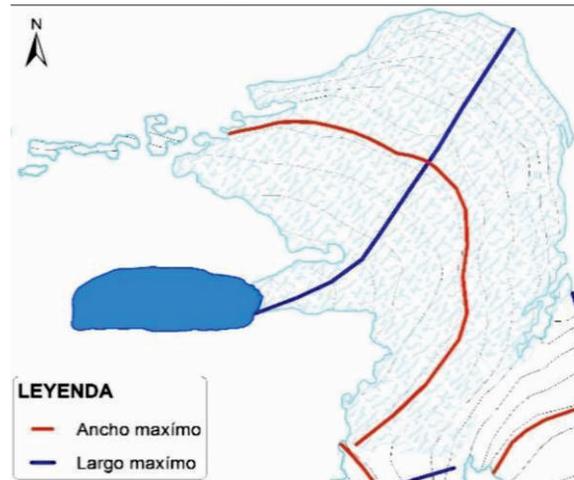


**Figura N° 40.**  
*Altitud mínima y máxima del glaciar.*

- **Medidas morfométricas (largo y ancho máximo)**

**Largo máximo:** Longitud que se determina con la digitalización de una línea desde el punto más bajo hacia el punto más elevado del glaciar, siguiendo las curvas de nivel (trazo perpendicular) y el flujo central del glaciar (Figura N° 41).

**Ancho máximo:** Se define por la digitalización de una línea perpendicular al largo máximo, identificando la distancia máxima entre los extremos de la geometría glaciar, siguiendo el relieve a través de las curvas de nivel. (Tabla N° 8).

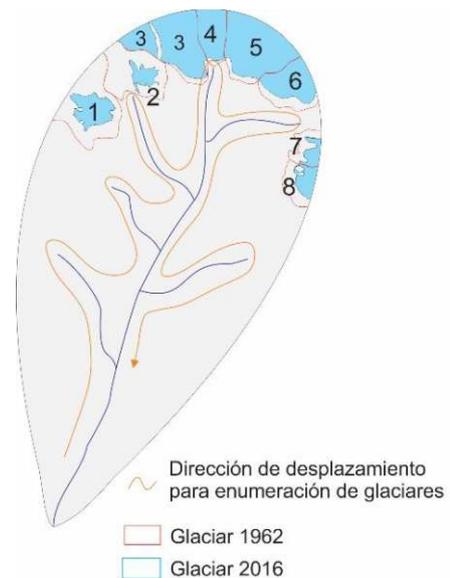


**Figura N° 41.** Digitalización del largo y ancho del glaciar.

- **Numeración de Glaciar**

Para la enumeración de un glaciar se ha de tener como criterio principal el sentido horario, siguiendo el cauce de drenaje; donde recibe la enumeración "1" el primer glaciar identificado en el análisis.

Para este proceso es necesario emplear la superficie registrada en el primer inventario realizado por Hidrandina, con el objetivo de identificar los glaciares fragmentados. En el caso de que en el primer inventario tuviera un sólo número, y en la actualidad, éste se halla fragmentado en 2 o más, cada parte recibe el mismo número (Figura N° 42 y Tabla N° 8).



**Figura N° 42.** Numeración de glaciares.

- **Identificador GLIMS (ID):**

Cada glaciar tiene un único identificador según la base de datos GLIMS, el cual es generado a partir de las coordenadas geográficas del centroide (Latitud sur, Longitud oeste) con 3 decimales. Se inicia con la conversión de la Longitud oeste a la Longitud este mediante la suma de  $360^\circ$  (Por ejemplo,  $-77.715^\circ + 360^\circ = 282,285^\circ$ ) y Latitud sur de  $8.880^\circ$  se mantiene. Luego se aplica la concatenación de caracteres sin considerar los decimales, la cual es obtenida por el siguiente proceso:

ID\_GLIMS = "G" & [GLIMS\_E] & "E" & [GLIMS\_S] & "S"

**ID\_GLIMS = G282285E8880S**

G= coordenada geográfica, E= Longitud este, S= Latitud sur.

• **Clasificación de los glaciares según GLIMS**

Para el desarrollo del inventario, es muy importante clasificar a los glaciares de forma detallada acorde a la normativa internacional, considerando que los glaciares continúan sufriendo cambios (retroceso glaciar) significativos a través del tiempo. Entonces, es necesario describir las características morfológicas existentes según los criterios establecidos en el manual<sup>5</sup> GLIMS (Rau et al., 2005), el cual es adaptado a las características de los glaciares tropicales del Perú (Tabla N° 7). Esto permite conocer el estado actual y la dinámica de los glaciares por medio del procesamiento e interpretación de las imágenes satélites: Aster, Spot, Sentinel 2 y otros equivalentes requeridos en el inventario. Además, este proceso se complementa con imágenes de alta resolución espacial del Google Earth, SASPlanet y fotografías tomadas en las inspecciones de campo.

**Tabla N° 7. Parámetros morfológicos según GLIMS**

	Código	Descripción		Código	Descripción
<b>d1</b> (Clasificación primaria) Corresponde a tipo del glaciar	0	Incierto o diversos	<b>d6</b> (Actividad de la lengua) Corresponde a la distancia del retroceso del frente glaciar entre un determinado periodo	0	Incierto, desconocido o no medido
	3	Capa de hielo		1	Retroceso marcado
	5	Glaciar de valle		2	Ligero retroceso
	9	Glaciar de roca		3	Estacionario
	6	Glaciar de montaña		4	Ligero avance
	7	Glaciarete y campos de nieve		5	Marcado avance
	10	Flujo de hielo		6	Posible aumento
	11	Hielo cubierto		7	Aumento conocido
	99	No definido		8	Oscilante
<b>d2</b> (Forma) Corresponde a la forma geométrica del glaciar	0	Incierto o diversos	<b>d7</b> (Morrena Código 1) Se clasifica a los glaciares por presentar morrenas cercanas del frente glaciar (distancia de 50 m)	0	No morrenas
	2	Cuenca compuesta		1	Morrenas terminales
	3	Cuenca simple		2	Morrenas lateral y/o media
	4	Circo		3	Morrena de empuje
	5	Nicho		4	Combinación 1 y 2
	6	Cráter		5	Combinación 1 y 3
	7	Falda de hielo		6	Combinación 2 y 3
	8	Grupo		7	Combinación 1, 2 y 3
	9	Resto		8	Desechos, incierto si es morrena
99	No definido	9	Morrena, tipo incierto o no listado		
			99	No definido	

<sup>5</sup> Disponible en: [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Glacier-ClassificationManual\\_V1\\_2005-02-10.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-ClassificationManual_V1_2005-02-10.pdf)

<b>d3</b> (Característica frontal) Corresponde a la forma del frente del glaciar	Código	Descripción
	0	Normales o diversos
	1	Piedemonte
	2	Expandido
	3	Lobulado
	4	Desprendimiento
	15	Desprendimiento terrestre
99	No definido	

<b>d4</b> (Característica longitudinal) Corresponde al perfil de los glaciares según el largo máximo del glaciar (cota máxima – cota mínima)	Código	Descripción
	0	Incierto o diversos
	1	Uniforme, regular
	2	Colgante
	3	Cascada
	4	Caída de hielo
	5	Interrumpido
99	No definido	

<b>d5</b> (Fuente principal de alimentación) Corresponde al tipo de fuente de alimentación	Código	Descripción
	0	Desconocido
	1	Nieve/flujo de nieve
	2	Avalanchas
	99	No definido

<b>d8</b> (Morrena Código 2) Se clasifica a los glaciares por presentar morrenas lejanas del frente glaciar	Código	Descripción
	0	No morrenas
	1	Morrenas terminales
	2	Morrena lateral y/o media
	3	Morrena de empuje
	4	Combinación 1 y 2
	5	Combinación 1 y 3
	6	Combinación 2 y 3
	7	Combinación 1, 2 y 3
	8	Desechos, incierto si es morrena
9	Morrenas, tipo incierto o no listado	
99	No definido	

<b>d9</b> (Lengua cubierta de escombros) Se clasifica la lengua del glaciar según el porcentaje del material de escombros	Código	Descripción
	0	Incierto
	1	Libre de detritos
	2	Parcialmente cubierto por detritos
	3	Mayormente cubierto por detritos
	4	Completamente cubierto por detritos
99	No definido	

**Tabla N° 8.** Características de los campos en las tablas de atributos.

Campo	Tipo y número de caracteres	Descripción
ID	Short (3)	Identificador común de los glaciares
Nombre	String/text (50)	Nombre del glaciar
Imagen	String/text (100)	Imágenes de satélite usadas
Reg	String/text (50)	Departamento donde pertenece el glaciar
Prov	String/text (50)	Provincia donde pertenece el glaciar
Dist	String/text (50)	Distrito donde pertenece el glaciar
Alt_min	Long (9)	Altitud mínima del glaciar
Alt_med	Long (9)	Altitud media del glaciar
Alt_medn	Long (9)	Altitud mediana del glaciar
Alt_max	Long (9)	Altitud máxima del glaciar
Pend_min	Long (9)	Pendiente mínima del glaciar
Pend_med	Long (9)	Pendiente media del glaciar
Pend_medn	Long (9)	Pendiente mediana del glaciar
Pend_max	Long (9)	Pendiente máximo del glaciar

Orient_min	Long (9)	Orientación mínima del glaciar
Orient_med	Long (9)	Orientación media del glaciar
Orient_max	Long (9)	Orientación máxima del glaciar
Orientacion	String/text (3)	Orientación manual con base a los umbrales definidos.
Vert	String/ text (20)	Vertiente a la que pertenece
Cuenca	String/ text (50)	Cuenca definida con el método Strahler
Scuenca	String/ text (50)	Subcuenca definida con el método de Strahler
Mcuenca	String/ text (50)	Microcuenca definida con el método Strahler
Cod_Hidrand	String/ text (12)	Código base del glaciar del año 1962/1955 (inventario por Hidrandina S.A.)
Area_Hidrand	Double (10,2)	Área base del glaciar según Hidrandina S.A.
Dist_d6	Double (10,2)	Distancia del frente glaciar
Num	Long (10)	Numeración del glaciar
Largomax	Double (10,2)	Largo máximo
Anchomax	Double (10,2)	Ancho Máximo
Cod_malla	Texto (100)	Código(s) de hoja a escala 1/25000
Cod_mapa	Texto (20)	Código(s) de mapas de impresión
Lat	String/ text (20)	Latitud, grados, minutos y segundos
Long	String/ text (20)	Longitud, en grados, minutos y segundos
D1_GLIMS	Short (3)	Tipo de glaciar según GLIMS
D2_GLIMS	Short (3)	Forma geométrica del glaciar
D3_GLIMS	Short (3)	Características frontales
D4_GLIMS	Short (3)	Característica longitudinal
D5_GLIMS	Short (3)	Tipo de fuente de alimentación
D6_GLIMS	Short (3)	Retroceso del frente
D7_GLIMS	Short (3)	Características de la morrenas cercanas
D8_GLIMS	Short (3)	Características de la morrenas alejadas
D9_GLIMS	Short (3)	Característica de la lengua según el material (escombros)
ID_GLIMS	String/ text (50)	Identificación según los dígitos del 1 al 9
Cod_glac	String/ text (20)	Código asignado al glaciar
Cod_glims	String/ text (12)	Código GLIMS según los dígitos del 1 al 9
X	Long (10)	Coordenada en el eje x (este)
Y	Long (10)	Coordenada en el eje y (norte)
Cordillera	String/ text (20)	La cordillera a la que pertenece
Restr	Short (2)	Condición del glaciar: 0 no inventariar y 1 inventariar
Frag	String/ text (5)	Fragmentos del glaciar
Pf_n7	String/ text (7)	Codificación de nivel 7, con la delimitación Pfasftetter
Area_m <sup>2</sup>	Double (10,2)	Área en m <sup>2</sup> redondeado a dos decimales
Area_Km <sup>2</sup>	Double (10,2)	Área en Km <sup>2</sup> redondeado a dos decimales
Obser	Texto (100)	Algunas observaciones



# X. APLICACIÓN METODOLÓGICA







Se empleó la metodología en las subcuencas Santa Cruz y Pariac (Cordillera Blanca – departamento de Ancash) como área piloto de aplicación. La información generada y explicada se representa en tablas y figuras, que serán consideradas en el ítem del informe del inventario de glaciares.

Las coberturas obtenidas en el inventario son incorporadas a un Sistema de Información Geográfica; se caracteriza cada unidad glaciar en base a las coberturas de límites políticos, unidades hidrográficas, entre otros, las cuales incorporan la información a la tabla de atributos de la cobertura de glaciares. Luego se realizan las consultas y análisis de la información, elaborando reportes, tablas resúmenes y presentaciones gráficas como los resultados del inventario, que brindarán información detallada y completa para el documento del inventario de glaciares.

Los resultados propuestos son importantes y lo mínimo requerido para realizar las comparaciones con inventarios posteriores.

## 10.1. Distribución de glaciares

De acuerdo con el tipo de glaciares identificados en el área de estudio se tabula la información y se elabora la tabla resumen de los datos principales (Tabla N° 9) y por unidades hidrográficas del inventario de glaciares (Tabla N° 10).

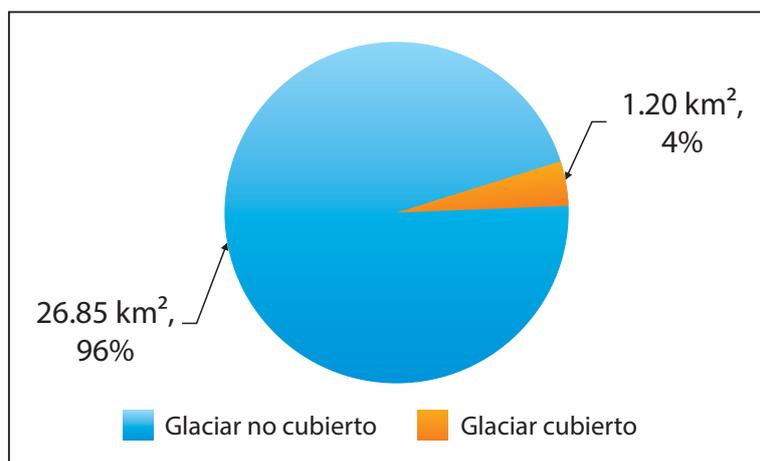
**Tabla N° 9.** Datos generales del inventario.

Tipo de glaciar	Cantidad	Área glaciar (km <sup>2</sup> )	%
No cubierto	34	26.85	96
Cubierto	4	1.20	4
<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>28.05</b>	<b>100</b>

**Tabla N° 10.** Datos del inventario según unidades hidrográficas.

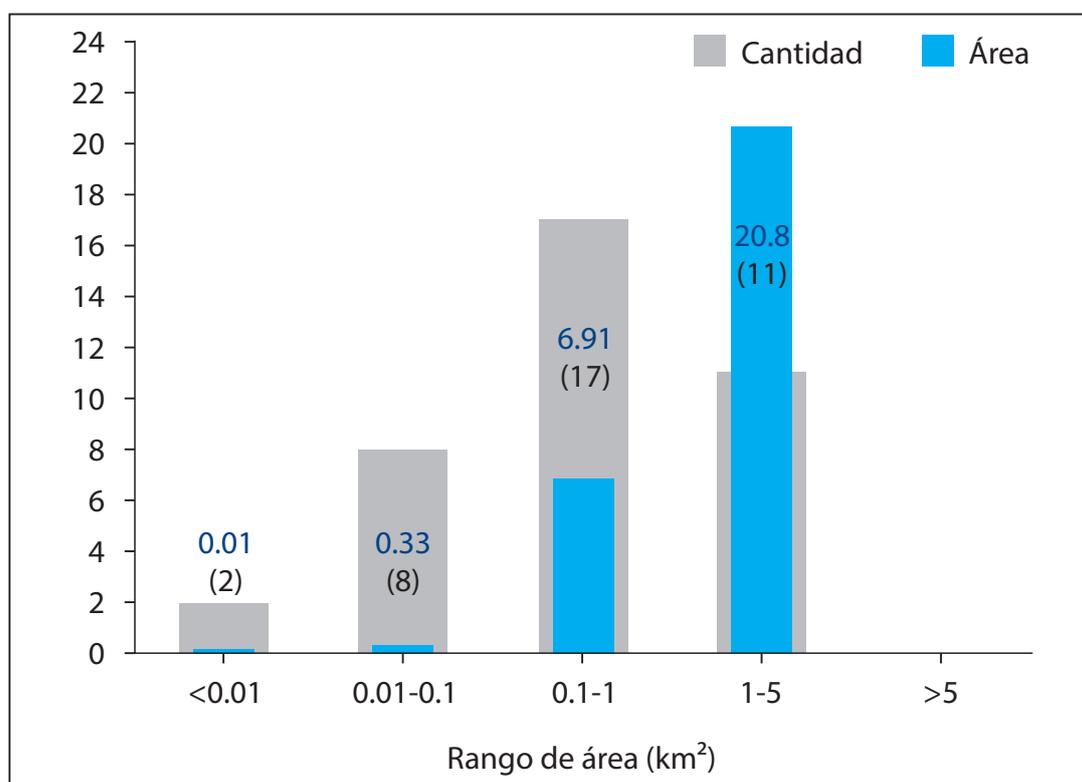
Cuenca	Subcuenca	Microcuenca	Cantidad	Área glaciar (km <sup>2</sup> )	Volumen glaciar (km <sup>3</sup> )
Santa	Santa Cruz	De los Baños	3	1.33	0.02
		Pacharuri	6	3.96	0.07
		Ragranco	3	3.02	0.07
		Santa Cruz	26	19.74	0.40
<b>Total</b>			<b>38</b>	<b>28.05</b>	<b>0.56</b>

La Figura N° 43 muestra la distribución de la superficie de cada tipo de glaciares en el área de estudio que permitirá cuantificar los cambios ocurridos por tipos de glaciares en los inventarios futuros. Esta representación se realiza con una hoja de cálculo (MS Excel).



**Figura N° 43.** Proporción de tipo de glaciares.

De los glaciares inventariados se cuantifica y representa el área de los glaciares inventariados por rangos de tamaño. Esta clasificación refleja la característica general de las cordilleras glaciares para identificar glaciares pequeños y grandes (Figura N° 44) y conocer su variación. El mayor número de glaciares tiene un área inferior a  $< 1 \text{ km}^2$ .



**Figura N° 44.** Distribución de glaciares por rangos de área.

## 10.2. Distribución de altitud mínima

La Figura N° 45 representa las altitudes mínimas en relación al tamaño de los glaciares. Permite observar claramente el desplazamiento de la altitud mínima en función al área glaciar, en comparación con el inventario anterior. Así se podrá verificar el comportamiento de los glaciares según rangos de tamaño.

Este análisis permite verificar el comportamiento de los glaciares en función a su extensión. En el 2016 se puede observar la reducción de áreas glaciares. Los glaciares de menor extensión se ubican a mayores altitudes en comparación a 1962.

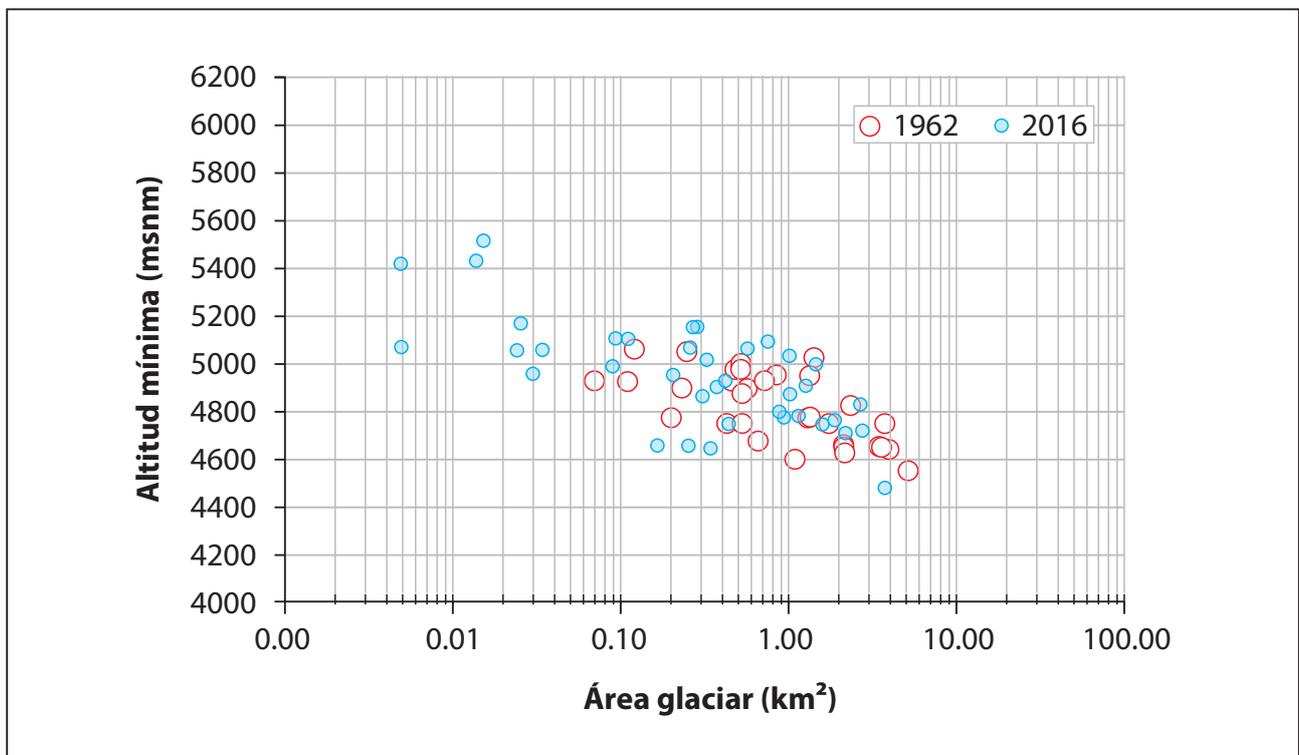


Figura N° 45. Variación de la altitud mínima en función al área glaciar.

## 10.3. Orientación

Se estiman los valores medios de los sectores de orientación para la evaluación del cambio de área glaciar, ya que se analiza la superficie expuesta por los glaciares. El parámetro es de tipo circular, clasificado en 8 sectores de los ejes cardinales, representado en una rosa de viento (Figura N° 46), que permite conocer la orientación predominante, concentración de área y número de glaciares.

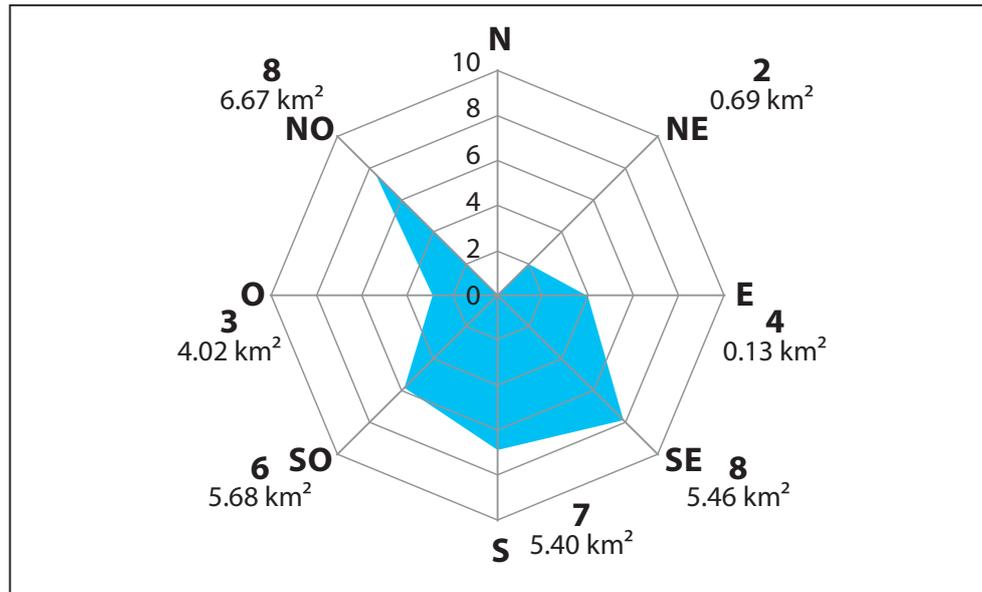


Figura N° 46. Concentración de área y cantidad de glaciares según orientación.

## 10.4. Pendiente

Se calcula la pendiente media en porcentaje. La Figura 47 representa la concentración de áreas y números de glaciares en función a la pendiente. De este modo, es posible analizar los cambios ocurridos en la topografía glaciar y su influencia en la variación de la geometría glaciar.

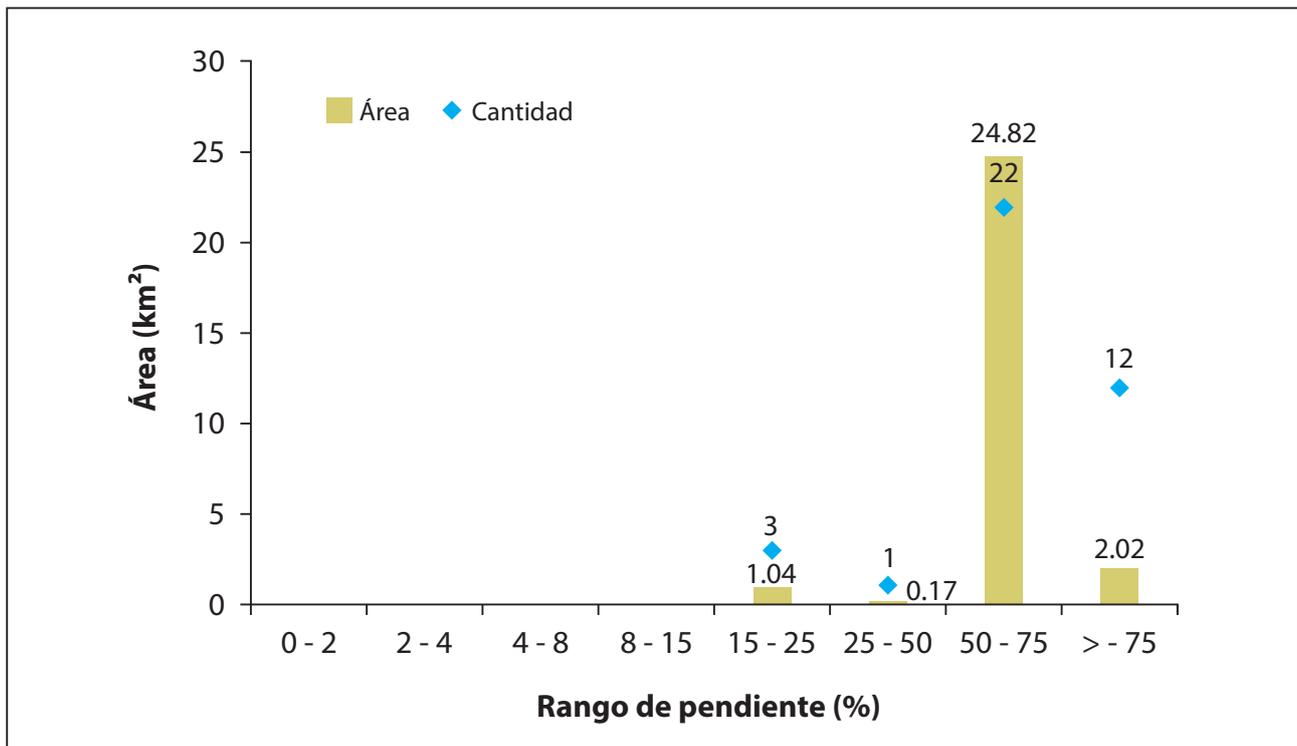


Figura N° 47. Concentración de área y cantidad de glaciares según pendientes.

## 10.5. Clasificación de la morfología glaciar

Se realiza la clasificación según los lineamientos de GLIMS y los resultados obtenidos de la caracterización asignada a cada glaciar (interpretadas en 9 dígitos) de acuerdo con la Tabla N° 11.

**Tabla N° 11. Clasificación morfológica de los glaciares. Caso: subcuenca Santa Cruz.**

Código nacional	Nombre	Clasificación primaria/Tipo	Forma (Digito 2)	Características frontales (Digito 3)	Perfil longitudinal (Digito 4)	Fuente de alimentación (Digito 5)	Actividad de la lengua (Digito 6)	Morrena 1 (Digito 7)	Morrena 2 (Digito 8)	Lengua cubierta por detritos (Digito 9)
1376926-2		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Incierto o diversos	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	No morrenas	Parcialmente cubierto por detritos
1376928-1		Glaciar de montaña	Cuenca simple	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrenas terminales	Parcialmente cubierto por detritos
1376928-2		Glaciar de montaña	Nicho	Normales o diversos	Uniforme, regular	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena late-ral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376922-3	Carhuallun 1	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376928-3		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-1		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-12		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	No morrenas	Libre de detritos
1376929-13		Glaciar de montaña	Falda de hielo	Desprendimiento terrestre	Colgante	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	No morrenas	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-14		Glaciar de montaña	Falda de hielo	Desprendimiento terrestre	Colgante	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	No morrenas	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-26		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-15		Glaciar de montaña	Falda de hielo	Desprendimiento terrestre	Colgante	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena late-ral y/o media	Incierto
1376929-5		Glaciar de montaña	Grupo	Normales o diversos	Incierto o diversos	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	No morrenas	Incierto
1376929-8		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Mayormente cubierto por detritos
1376929-16		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Morrena late-ral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-9		Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-18	Taulliraju	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos

1376929-2	Glaciar de montaña	Cuenca simple	Expandido	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena lateral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-4	Glaciar de montaña	Falda de hielo	Desprendimiento terrestre	Colgante	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Incierto
1376929-3	Glaciar de montaña	Falda de hielo	Desprendimiento terrestre	Colgante	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Incierto
1376929-25	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-23	Glaciar de montaña	Cuenca simple	Expandido	Interrumpido	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Mayormente cubierto por detritos
1376929-19	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Interrumpido	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrenas terminales	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-17	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-10	Glaciar de montaña	Circo	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376922-2	Glaciar de montaña	Cuenca simple	Expandido	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376928-5	Glaciar de montaña	Cuenca compuesta	Expandido	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Mayormente cubierto por detritos
1376929-21	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Desprendimiento terrestre	Incierto o diversos	Avalanchas	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena lateral y/o media	Mayormente cubierto por detritos
1376929-27	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Expandido	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Parcialmente cubierto por detritos
1376928-6	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Lobulado	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	No morrenas	Libre de detritos
1376929-24	Glaciar de montaña	Cuenca simple	Expandido	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena lateral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-22	Glaciar de montaña	Incierto o diversos	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena lateral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376929-7	Hielo cubierto	Incierto o diversos	Normales o diversos	Incierto o diversos	Desconocido	Incierto, desconocido o no medido	Combinación 1 y 2	Morrena lateral y/o media	Completamente cubierto por detritos
1376926-1	Hielo cubierto	Incierto o diversos	Normales o diversos	Incierto o diversos	Desconocido	Incierto, desconocido o no medido	Combinación 1 y 2	Combinación 1 y 2	Completamente cubierto por detritos
1376922-1	Hielo cubierto	Incierto o diversos	Normales o diversos	Incierto o diversos	Desconocido	Incierto, desconocido o no medido	Morrenas lateral y/o media	Combinación 1 y 2	Completamente cubierto por detritos
1376928-4	Hielo cubierto	Incierto o diversos	Normales o diversos	Incierto o diversos	Desconocido	Incierto, desconocido o no medido	Morrenas lateral y/o media	Combinación 1 y 2	Completamente cubierto por detritos
1376929-20	Valle glaciar	Cuenca compuesta	Normales o diversos	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Morrena lateral y/o media	Parcialmente cubierto por detritos
1376926-5	Valle glaciar	Cuenca simple	Expandido	Interrumpido	Nieve/flujo de nieve	Ligero retroceso	No morrenas	Combinación 1 y 2	Mayormente cubierto por detritos
1376929-11	Valle glaciar	Cuenca simple	Desprendimiento	Cascada	Nieve/flujo de nieve	Incierto, desconocido o no medido	No morrenas	Combinación 1 y 2	Mayormente cubierto por detritos

## 10.6. Reducción del área glaciar

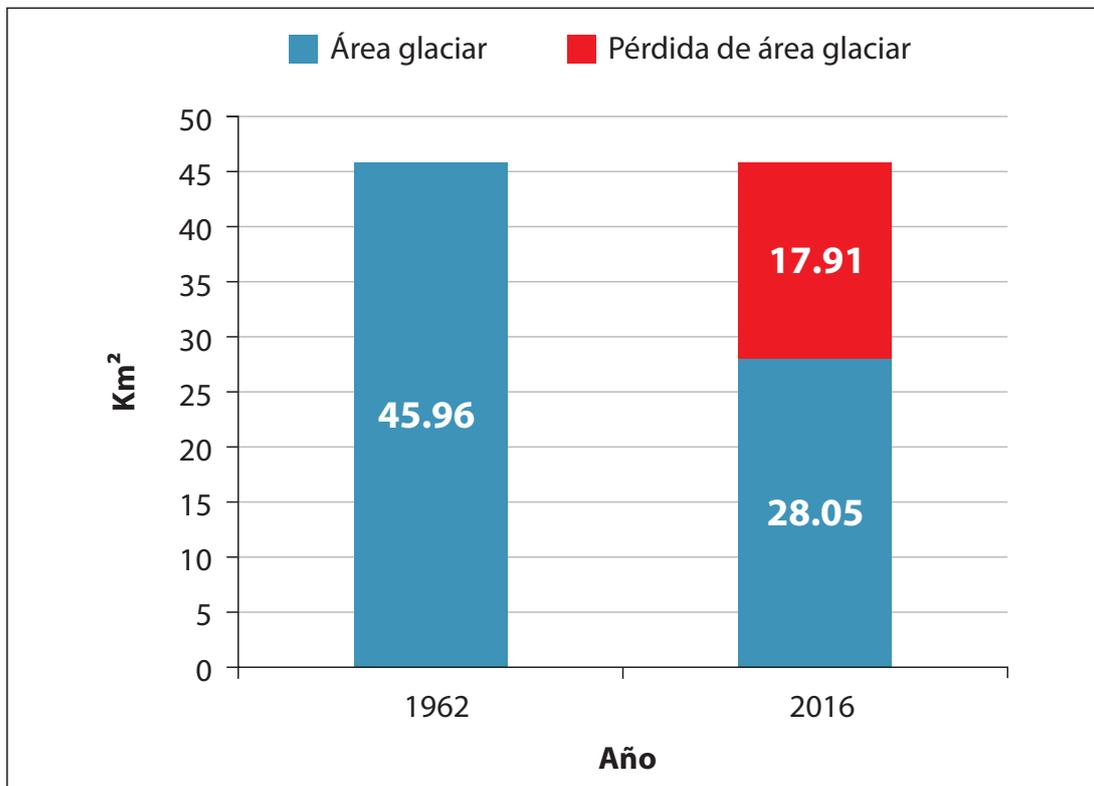
En la Figura N° 48 se comparan los resultados del área glaciar entre el inventario base (1962) y el inventario actual (2016), permitiendo observar el cambio de la geometría de los glaciares y pérdida de área glaciar por efecto de la desglaciación, evidenciando que el proceso de ablación anual es superior al de acumulación. La tasa de reducción de área glaciar es de 0.7%/año durante los 54 años de análisis (Tabla N° 12).

**Tabla N° 12.** Reducción de área glaciar. Caso: subcuenca Santa Cruz.

Inventario		HIDRANDINA S.A.	NAIGEM
Año		1962 (*)	2016 (**)
Área glaciar (km <sup>2</sup> )		45.96	28.05
Reducción de área glaciar (km <sup>2</sup> )	1962 y 2016 (54 años)	17.91 (39%)	

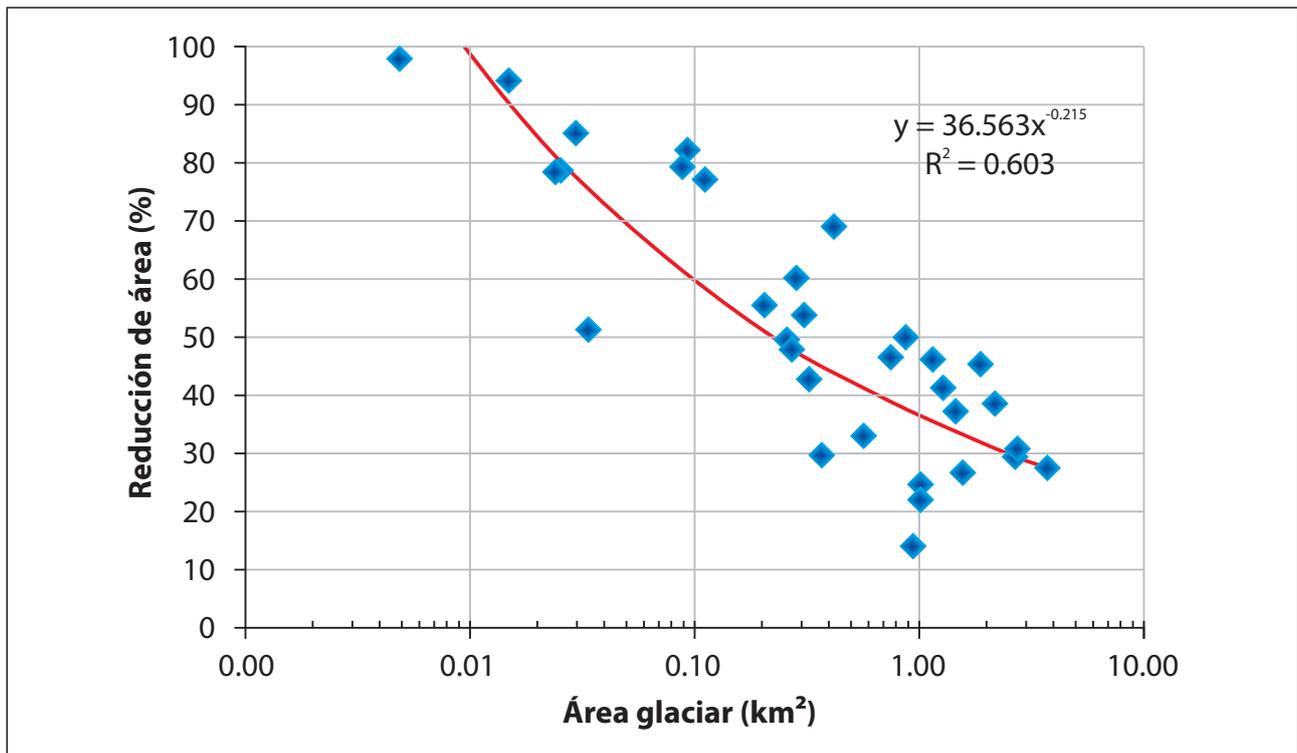
\* En base a fotografías aéreas.

\*\* En base a imágenes de satélite Spot 7



**Figura N° 48.** Cambio de área glaciar. Caso: subcuenca Santa Cruz.

La Figura N° 49, representa la tendencia de la reducción del área glaciar en los glaciares de la subcuenca Santa Cruz. De esta forma, se puede entender que los glaciares de menor tamaño (1 km<sup>2</sup>) son más susceptibles a desaparecer en un corto tiempo, debido a que son más vulnerables a los procesos de fragmentación y reducción de su área glaciar.



**Figura N° 49.** Cambio de área glaciar por rango de tamaño.

## 10.7. Tabla sistémica y listado alfabético de glaciares inventariados

La tabla sistémica se realiza a través de un tratamiento estadístico, conteniendo 23 campos principales (Tabla N° 14) simplificado de la tabla de atributo de las características de los glaciares, se presenta según la distribución de vertiente, cuenca y subcuenca. Además, se genera un listado alfabético de los glaciares inventariados (Tabla N° 13).

**Tabla N° 13.** Listado alfabético de los glaciares. Caso: subcuenca Pariac.

Nombre	Código nacional	Vertiente	Cuenca	Subcuenca	N° hoja	N° de mapa / N° página
Huantsan 1	1376974-7	Pacífico	Santa	Pariac	20-i-IV-NE / 19-i-III-SE	4







## XI. ELABORACIÓN DEL MAPA





El resultado visible de un inventario de glaciares son los mapas, en los cuales se incluyen todas las coberturas de glaciares inventariados.

El punto de partida para la elaboración de los mapas es personalizar gráficamente un determinado patrón de trabajo, es decir, la elaboración del template, considerando dos criterios; primero, la materia a ser representada (lo que se quiere representar), la escala y el tipo de usuario final; el segundo criterio es determinar el formato que se quiere mostrar, es decir, para un informe, una reunión de análisis, una presentación Power Point, afiches, etc. En este contexto, para fines del inventario nacional de glaciares, los mapas son insumos esenciales porque formarán parte del documento técnico. En esta etapa se usa el software de ArcGis - ArcMap, a través de los siguientes módulos: Standard, Editor, Layout View (vista en composición de mapas), Tools, Draw, Labeling, Data Driven Pages (Figura N° 50).

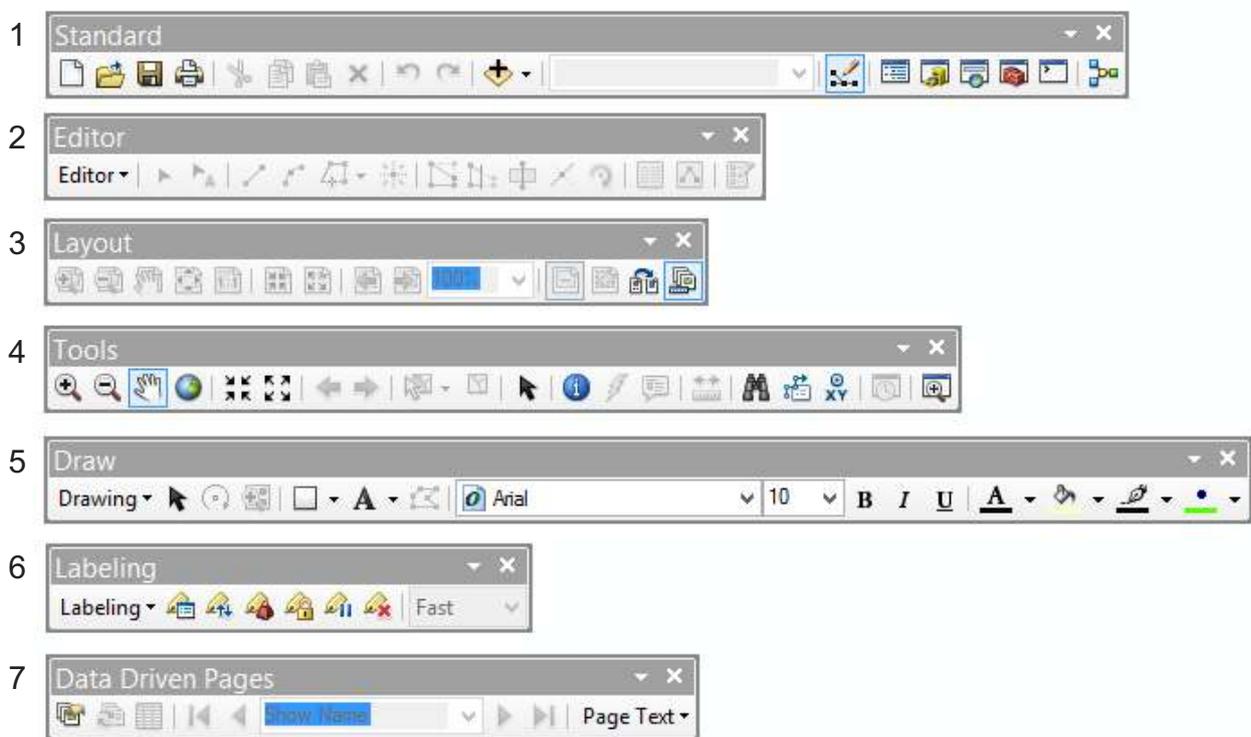
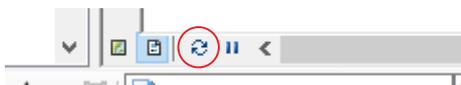


Figura N° 50. Herramientas más usadas del ArcMap.

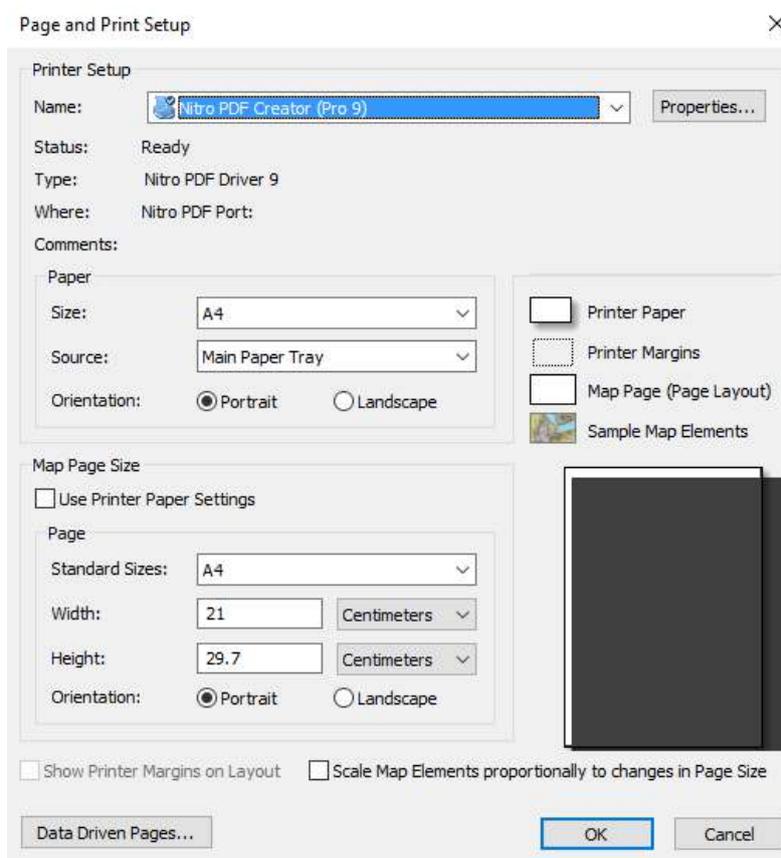
## 11.1. Definición del área de impresión

El área de impresión del mapa, se define según la escala de salida (1:75,000, 1:40,000, 1:25,000, etc.) en base al tamaño del papel (A0, A1, A2, A3, A4), usando la herramienta LAYOUT VIEW del Arcmap, donde se visualiza la hoja de impresión para iniciar con la distribución de la información a mostrar en los mapas de salida. (Figura N° 51).



**Figura N° 51.** Herramienta layout view.

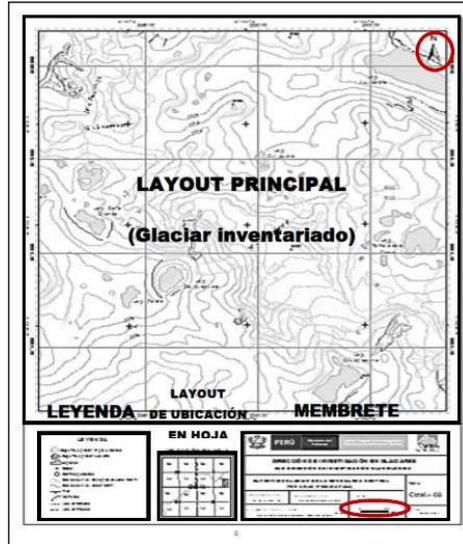
Luego, se desplaza la herramienta PAGE AND PRINT SETUP para definir el tamaño y la orientación del papel, en este caso se muestra de forma vertical. (Figura N° 52).



**Figura N° 52.** Herramienta Page and print setup.

## 11.2. Adecuación del entorno de impresión

Definimos la distribución de todas las geoformas a mostrar en el mapa según la hoja de impresión elegida, en este caso, se muestra en un formato A4 donde se distribuye armónicamente en cuatro ventanas como: layout principal (zona glaciar inventariada), la leyenda (simbología y toponimia de las capas mostradas en el layout principal), layout de ubicación en hoja (según malla de referencia a escala), membrete, norte magnético y escala gráfica según la figura N° 53.



**Figura N° 53.** Distribución de la información a mostrar en el mapa.

La información mostrada en el mapa debe cumplir las siguientes características (Tablas N° 15 y 16):

**Tabla N° 15.** Características de los layouts.

NOMBRE	GROSOR DE BORDE	COLOR DE BORDE
Layout principal (zona glaciar)	0.5	Gris (RGB 78, 78, 78)
Layout de ubicación en hoja	0.5	Gris (RGB 78, 78, 78)
La leyenda	0.5	Gris (RGB 78, 78, 78)
Ubicación en hoja	0.5	Gris (RGB 78, 78, 78)

**Tabla N° 16.** Características del norte magnético y escala gráfica

NOMBRE	MODELO	COLOR
Norte magnético	ESRI North 3	Blanco y negro
Escala gráfica	Alternating Scale Bar 3	Negro

Los modelos y características mostradas en el mapa dentro layers (Tabla N° 17), deben cumplir las siguientes características, haciendo el uso de la herramienta LABELING del ArcGis:

**Tabla N° 17.** Características de los modelos mostrados en el mapa

LAYOUT PRINCIPAL: ZONA GLACIAR RASTER			
NOMBRE	RANGO DE COLOR	ALGORITHM	DISPLAY
Modelo digital de elevación (DEM)	Bajo, blanco (RGB 255, 255, 255) Alto, gris ( RGB 224, 224, 224)	CIE lab	Contraste 0% Brillo 0% Transparencia 60%
Hillshade (modelo de sombras)	Bajo, blanco (RGB 255, 255, 255) Alto, gris ( RGB 156, 156, 156)	CIE lab	Contraste 0% Brillo 0% Transparencia 0%

LAYOUT: UBICACIÓN EN HOJA				
NOMBRE	COLOR	ESPECIFICACIONES	TRANSPARENCIA	FUENTE
Malla de impresión	Fondo rayado horizontal, rojo (RGB 255, 0, 0) Contorno, rojo (RGB 255, 0, 0) Fondo, transparente	Grosor de línea de contorno 0.5, ángulo 45° y separación 2.0	0%	-
Malla 1:50,000	Contorno punteado, negro (RGB 0, 0, 0) Fondo, transparente	Grosor de línea de contorno 0.6	0%	Arial black, tamaño 8, color negro (RGB 0, 0, 0)
Malla 1:25,000	Contorno, gris (RGB 135, 135, 135) Fondo, transparente	Grosor de línea de contorno 0.5	0%	Arial black, tamaño 9.5, color negro (RGB 0, 0, 0)
Cordillera	Contorno, amarillo (RGB 255, 170, 0) Fondo, transparente	Grosor de línea de contorno 0.5	0%	-
Malla 1:100,000	Contorno, negro (RGB 0, 0, 0)	Grosor de línea de contorno 2.0	0%	Arial, tamaño 8, color negro (RGB 0, 0, 0)

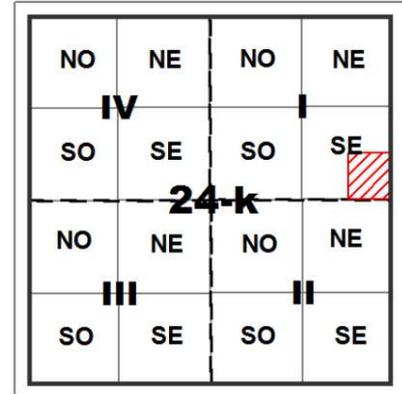
Además, se considera la toponimia de algunas geoformas a través de las anotaciones (etiqueta, proceso de conversión de la toponimia de formato label a labeling a través de la herramienta ArcMap) que son visualizadas en el layout principal en base a la escala de salida del mapa (Tabla N° 18); para ello, definimos las capas a editar: nevados, señales, lagunas, ríos, cotas y centros poblados con las siguientes características:

**Tabla N° 18.** Características de las anotaciones.

ANOTACIONES					
NOMBRE DE ETIQUETA	TAMAÑO DE LETRA	FUENTE	OTRAS ESPECIFICACIONES	COLOR	PROPIEDADES DE COLOCACIÓN
Nevados	9	Times new roman	9	gris (RBG 78, 78, 78)	curvo
Ríos	7	Arial	7	azul (RBG 0, 132, 168)	curvo
Lagunas	8	Arial	8	azul (RBG 0, 112,255)	horizontal
Curvas de nivel	7	Calibri	7	marrón (RBG 115, 76, 0)	curvo
Cotas	8	Arial	8	Negro (RBG 0, 0, 0)	offset
Centros poblados	5	Arial	5	Negro (RBG 0, 0, 0)	offset



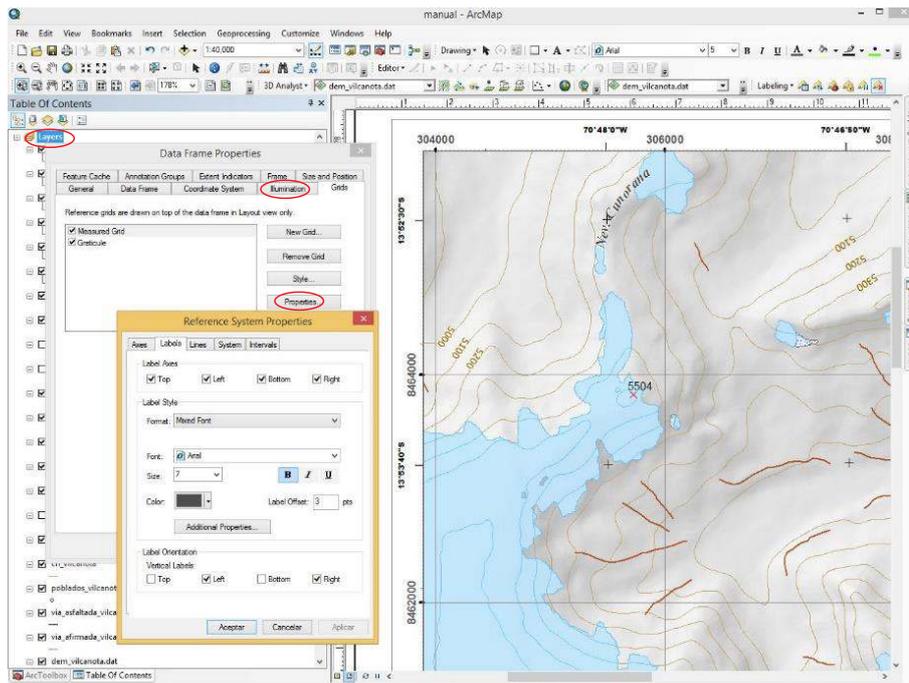
Por otro lado, de manera manual, la enumeración de cada malla, se inicia con la malla 1:100,000, sobre la ubicación de las mallas 1:50,000 y 1:25,000; luego se considera en sentido horario desde la parte superior derecha, como se muestra en la figura N° 54.



**Figura N° 54.** Enumeración de las mallas que representa el layout principal.

### 11.3. Grillas

Se añade las grillas en coordenadas Geográficas y UTM siguiendo los pasos de la figura N° 55 considerando las características mostradas en la tabla N° 19; esto indica el sistema de referencia en que se han inventariado los glaciares.



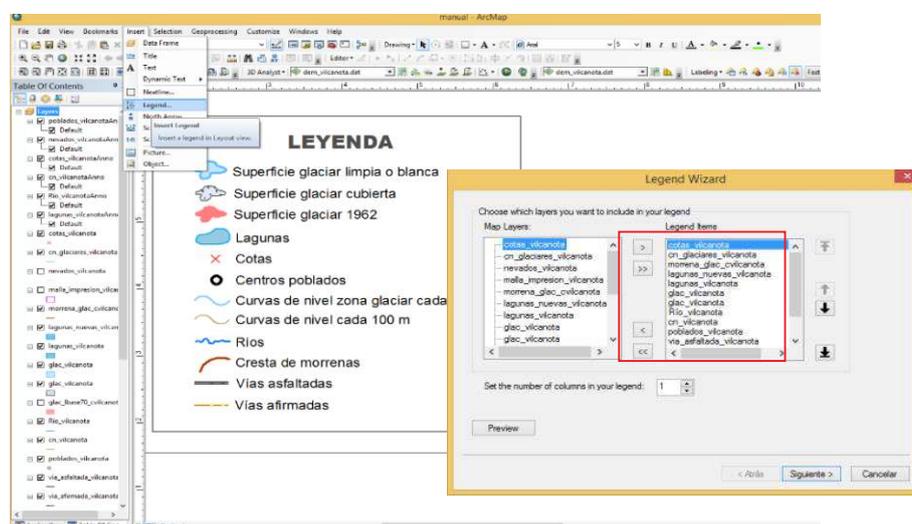
**Figura N° 55.** Pasos para insertar las grillas según coordenadas geográficas y UTM.

**Tabla N° 19.** Características de las grillas.

GRILLA	FUENTE	TAMAÑO	COLOR	LABEL OFSET	LINES	INTERVALOS
Geográfica	Arial black	5	Negro (RGB 0,0,0)	10	Ticks 5.0, color negro (RGB 0,0,0)	X: 0° 1' 10" X: 0° 1' 10"
UTM	Arial	7	Gris (RGB 78, 78, 78)	3	Línea 0.5, color gris (RGB 78, 78, 78)	x: 20000 Y: 20000

## 11.4. Leyenda

La leyenda se inserta con la herramienta INSERT > LEYEND, definiendo un orden en que han de mostrarse las geformas del layout principal (Figura N° 56).



**Figura N° 56.** Pasos para incluir la leyenda en el mapa base al layout principal.

Los símbolos mostrados en la leyenda deben contener las siguientes características (Tabla N° 20):

**Tabla N° 20.** Características de los símbolos de la leyenda.

NOMBRE	SÍMBOLO	COLOR	ESPECIFICACIONES	TRANSPARENCIA	FUENTE	TAMAÑO DE LETRA
Superficie glaciar blanco		Color de fondo, celeste (RGB 190, 232, 255) Contorno, celeste (RGB 97, 189,255)	Grosor de línea de contorno 0.4	30%	Arial	5.3
Superficie glaciar cubierto		Color de fondo, blanco (RGB 229, 235, 250) Puntos, (RGB 130, 130, 130) contorno, celeste (RGB 97, 189,255)	Grosor de línea de contorno 0.4	0%	Arial	5.3
Superficie glaciar 1962		Color de fondo, rojo (RGB 255, 0,0)	Sin contorno de línea	65%	Arial	5.3
Lagunas		Color de fondo, celeste (RGB 0, 169, 230) contorno, azul (RGB 0, 112,255)	Grosor de línea de contorno 0.4	50%	Arial	5.3
Cotas		Rojo (RGB 255, 0, 0)	Forma de aspa de tamaño 7.0	0%	Arial	5.3
Curvas de nivel zona glaciar		Celeste (RGB 97, 189,255)	Grosor de línea 0.4	20%	Arial	5.3
Curvas de nivel cada 100 m.		Marrón (RGB 39, 43, 76)	Grosor de línea 0.4	0%	Arial	5.3
Ríos		Azul (RGB 0, 112,255)	Grosor de línea 0.4	0%	Arial	5.3
Morrenas		Marrón (RGB 115,38,0)	Grosor de línea 0.8	0%	Arial	5.3
Vía asfaltada		Línea gruesa, gris (RGB 78, 78, 78) Línea punteada, plomo (RGB 156, 156, 156)	Grosor de línea gruesa 1.4 Grosor de líneas punteadas 0.18	0%	Arial	5.3
Vía afirmada		Línea gruesa, amarillo (RGB 255, 235, 166) Línea punteada, plomo (RGB 78, 78, 78)	Grosor de línea gruesa 1.5 Grosor de líneas punteadas 0.2	0%	Arial	5.3

## 11.5. Membrete

Se define la información a mostrar en el membrete (Tabla N° 21) y con la ayuda de líneas guías se realiza el diseño, usando la herramienta DRAWING (Figura N° 57); hecho el diseño, se ingresa la información de las mallas que representan el layout principal a través del uso de la herramienta DATA DRIVEN PAGE SETUP del Arcmap (datos de la malla de impresión, el campo que contiene el número de las mallas y el número de mapa que saldrá en el membrete).

**Tabla N° 21.** Características del membrete.

TRAZO DEL MEMBRETE			
NOMBRE	LARGO	ANCHO	COLOR
Logo membretado de la institución	7.10 cm	0.89 cm	color oficial
Logo de la institución	1.13 cm	0.96 cm	color oficial
Líneas de contorno	-	-	gris (RBG 250, 250, 250), grosor de línea 0.5
TEXTO			
NOMBRE	FUENTE	TAMAÑO DE LETRA	COLOR
Dirección	Arial black	6	color negro (RBG 0, 0, 0)
Subdirección	Arial black	6	color negro (RBG 0, 0, 0)
Título de la cordillera	Arial black	6	color negro (RBG 0, 0, 0)
Elaborado	Arial	5	color negro (RBG 0, 0, 0)
Aprobado	Arial	5	color negro (RBG 0, 0, 0)
Sistema de proyección	Arial	5	color negro (RBG 0, 0, 0)
Mapa	Arial	10	color negro (RBG 0, 0, 0)
Fecha	Arial	5	color negro (RBG 0, 0, 0)
Escala numérica	Arial	5	color negro (RBG 0, 0, 0)

 <b>PERÚ</b> Ministerio del Ambiente		Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña		 INAIGEM Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña	
<b>DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES</b> <b>SUB DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN GLACIOLÓGICA</b>					
<b>SUPERFICIE GLACIAR DE LA CORDILLERA BLANCA</b> <b>POR HOJA (Fase I)</b>				MAPA:  <b>Blca - 07</b>	
ELABORADO POR: Sub Dirección de Investigación Glaciológica	REVISADO POR: Ing. Marco Zapata Luyo	APROBADO POR: Ing. Benjamín Morales Amao	ESCALA: 1:40,000	0  0.5 Km	
SISTEMA DE PROYECCIÓN: Cartesianas UTM - DATUM WGS84 - zona 18 Sur			FECHA: Agosto, 2017		

Figura N° 57. Distribución de la información del membrete proveniente de la sistematización de mallas.

## 11.6. Producción de mapas

Una vez terminado el mapa (Figura N° 58), se inicia el proceso de exportación en formatos digitales como JPG, PDF o se imprime, seleccionando el tamaño de salida de la hoja en que se ha elaborado el mapa, para conservar el tamaño real en relación a la escala gráfica y luego sea comparada a una escala natural a través de la medición con el escalímetro.

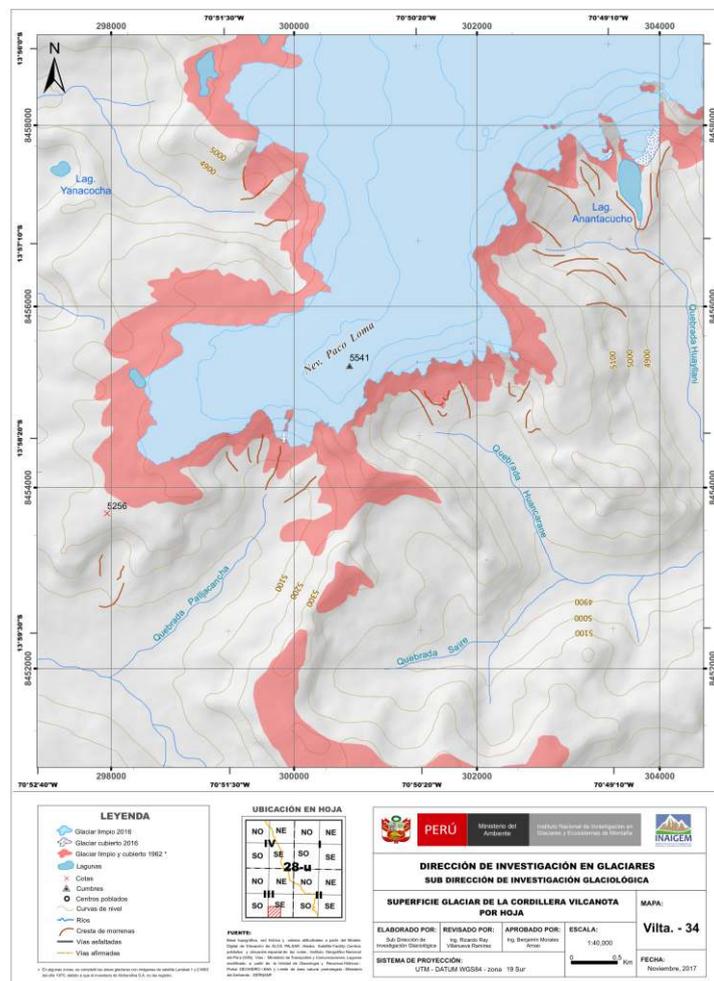


Figura N° 58. Mapa modelo para inventario de glaciares.

## **XII. ESTRUCTURA DEL CONTENIDO PARA LOS INFORMES DEL INVENTARIO DE LAS CORDILLERAS GLACIARES DEL PERÚ**





Como ya se mencionó, la intención es lograr que el informe técnico del inventario glaciar se elabore en función a los criterios estandarizados, enfocados a explicar el comportamiento de los glaciares y sus impactos asociados en tema de recursos hídricos y gestión de riesgos de origen glaciar, con énfasis en el periodo de estiaje, donde existe el mayor aporte hídrico de los glaciares dentro del área de estudio.

Culminadas las etapas del inventario de glaciares, el equipo de especialistas y técnicos procederán a elaborar el informe técnico de acuerdo con los lineamientos según la estructura establecida por la Dirección de Investigación en Glaciares del INAIGEM.

El informe técnico contempla como unidad de análisis el glaciar que se encuentra distribuido en cada una de las 18 cordilleras glaciares del Perú, analizado según los siguientes niveles de área de estudio:

<b>Nivel hidrográfico</b>	Vertiente, cuenca, subcuenca y microcuenca.
<b>Nivel socio económico</b>	Departamento, provincia, distrito, actividades productivas afectadas por la reducción glaciar.

Cada dos años se elaborará el inventario e informe técnico compilado a nivel de cordilleras.

## 12.1. Metodología

La metodología para el proceso de inventario sigue una secuencia lógica que se describe y divide en seis etapas (Figura N° 59):

### 12.1.1. Etapa I: Recopilación de información geoespacial

Se realiza el acopio de información geoespacial para el proceso del inventario; la cual corresponde a la cartografía, topografía, temática, imágenes de satélite y modelos digitales de elevación, entre otros. Para obtener la información requerida, se realizan las coordinaciones con las instituciones competentes de acuerdo con el tipo de información oficial necesaria, que pueden ser en formato digital o analógico.

### 12.1.2. Etapa II: Procesamiento

Adecuar y estandarizar la información cartográfica, imágenes de satélite, modelos digitales de elevación y toda información geoespacial al sistema de coordenadas UTM con Datum WGS84 zona 17, 18, y 19 (Perú).

Además, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para las imágenes de satélite sin nivel de procesamiento, se realizan las correcciones: geométrica (ortorectificación y/o georreferenciación), radiométrica (conversión de números digitales a valores de reflectancia) y otras que requieran para mejorar los resultados en el mapeo de las superficies glaciares.
- Aquellas imágenes de satélite con bandas espectrales (verde e infrarrojo de onda corta) de diferentes resoluciones espaciales pasan a un proceso de homogenización del tamaño de pixel para la aplicación del NDSI u otro método de clasificación de coberturas.

### 12.1.3. Etapa III: Mapeo de glaciares

Esta etapa corresponde a la identificación y delimitación del área glaciario no cubierta, a través de la clasificación automática (NDSI) y/o clasificación supervisada de las imágenes de satélite.

Los glaciares cubiertos se digitalizan de manera directa en base a la interpretación y análisis visual, utilizando imágenes de satélite de resolución espacial del Google Earth. Ambas coberturas de glaciares, se integran a un proyecto SIG para su manejo y almacenamiento, considerando la individualización de los glaciares según los límites de las unidades hidrográficas.

### 12.1.4. Etapa IV: Caracterización de glaciares

Se genera una base de datos que contemple información gráfica y alfanumérica relacionada al inventario de glaciares (cobertura glaciario, morrenas, medidas morfométricas y centroide, entre otros).



Considerar en cada glaciar la caracterización detallada según los parámetros establecidos por el INAIGEM y GLIMS, considerando las inspecciones técnicas de campo.

#### **12.1.5. Etapa V: Elaboración del informe técnico**

En esta etapa se organiza toda información generada y obtenida de otras fuentes secundarias para la elaboración de los instrumentos estadísticos y mapas temáticos a ser considerados para la redacción del informe técnico.

#### **12.1.6. Etapa VI: Publicación**

La publicación del inventario es para dar a conocer los resultados obtenidos a los organismos técnicos y políticos del gobierno Central, Regional y Local; a la academia y a las comunidades científicas; y pueden ser motivo de publicación en revistas indexadas nacionales o internacionales.

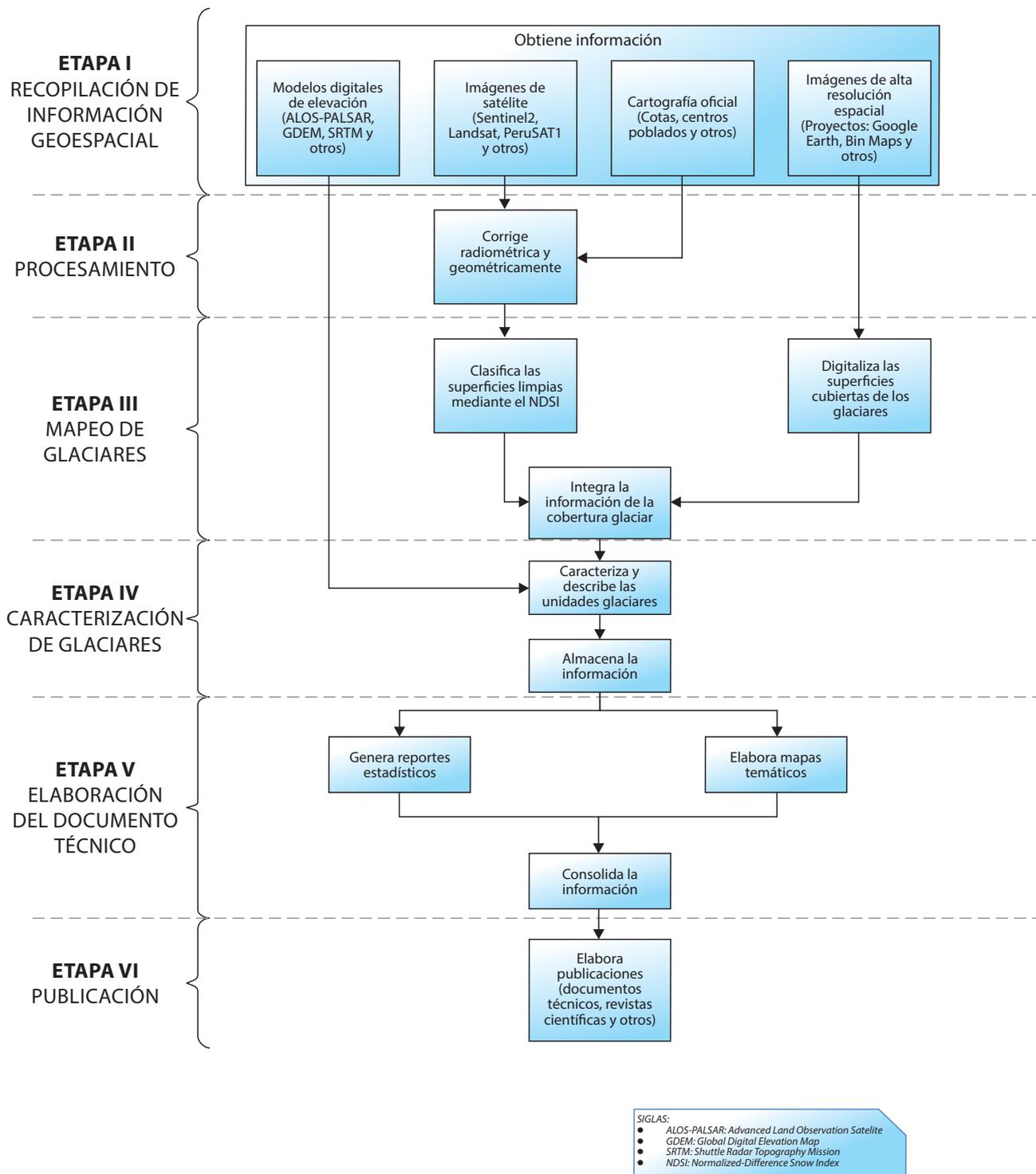


Figura N° 59. Diagrama de la metodología del inventario.

## 12.2. Diagrama del proceso de elaboración del informe

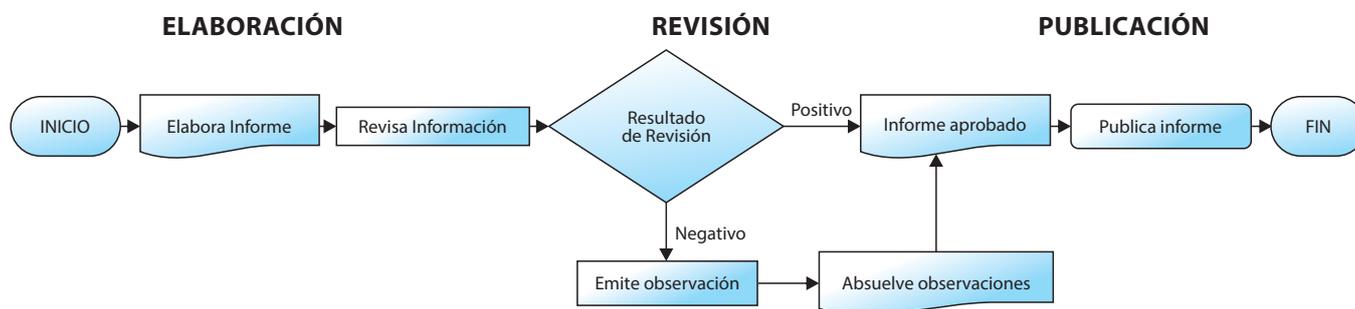


Figura N° 60. Proceso del informe para su publicación.

También se menciona el año de referencia en que se obtiene los datos.

## 12.3. Resultados de las coberturas glaciares en las cordilleras del Perú

Es importante mencionar que éste documento nos ha permitido obtener el “Inventario Nacional de Glaciares del Perú”, trabajado a una escala 1:25,000, impreso a una escala 1:40,000 con imágenes satelitales Sentinel – 2 de resolución de 10 m del año 2016. Los informes de cada cordillera y el resumen General se oficializarán en el primer trimestre del 2018 y los resultados de forma resumida se presenta en la Tabla N° 22.

Tabla N° 22. Prioridad de inventario según las áreas glaciares.

Cordillera	Área		Departamento	
	km <sup>2</sup>	%	Influencia del límite de cordillera	Influencia de la superficie glaciar
Chila	0.19	0.02	Arequipa	Arequipa
Chonta	0.39	0.04	Lima, Junín, Ica, Ayacucho y Huancavelica	Junín y Huancavelica
La Raya	1.90	0.17	Cusco y Puno	Cusco y Puno
Huanzo	2.91	0.26	Arequipa, Apurímac, Ayacucho y Cusco	Arequipa, Apurímac y Cusco
La Viuda	3.84	0.34	Pasco, Huánuco, Junín y Lima	Pasco, Junín y Lima
Huallanca	5.24	0.47	Ancash	Ancash
Huagoruncho	7.58	0.68	Huánuco y Pasco	Huánuco y Pasco
Huaytapallana	21.42	1.92	Huancavelica y Junín	Junín
Urubamba	23.54	2.11	Cusco	Cusco
Raura	25.62	2.30	Huánuco, Pasco y Lima	Huánuco, Pasco y Lima
Carabaya	31.05	2.79	Cusco y Puno	Cusco y Puno
Apolobamba	39.63	3.56	Puno	Puno
Central	42.44	3.81	Lima y Junín	Lima y Junín
Ampato	50.05	4.49	Arequipa	Arequipa
Huayhuash	53.06	4.76	Ancash, Huánuco y Lima	Ancash, Huánuco y Lima
Vilcabamba	101.00	9.07	Cusco y Apurímac	Cusco y Apurímac
Vilcanota	255.44	22.93	Cusco y Puno	Cusco y Puno
Blanca	448.81	40.28	Ancash	Ancash
<b>Total</b>	<b>1114.10</b>	<b>100.00</b>		

## 12.4. Estructura del informe

PRESENTACIÓN

INTRODUCCIÓN

SIGLAS

### I. GENERALIDADES

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Ubicación
- 1.4. Extensión
- 1.5. Accesibilidad y vías de comunicación

### II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- 2.1. Geografía
- 2.2. Clima
- 2.3. Geología
- 2.4. Geomorfología
  - 2.4.1. Valles, Cañones y Cordilleras
  - 2.4.2. Hidrografía
  - 2.4.3. Ecosistemas

### III. GLACIARES

- 3.1. Características principales
- 3.2. Monitoreo de glaciares
- 3.3. Riesgos de glaciares
- 3.4. Inventario de glaciares
  - 3.4.1. Metodología
    - 3.4.1.1. Recopilación de información geoespacial
    - 3.4.1.2. Procesamiento
    - 3.4.1.3. Mapeo de glaciares
    - 3.4.1.4. Caracterización de glaciares
    - 3.4.1.5. Elaboración del informe técnico
    - 3.4.1.6. Publicación

### IV. ACTIVIDADES ECONOMICAS PRODUCTIVAS

- 4.1. Agricultura
- 4.2. Energía
- 4.3. Minería
- 4.4. Vivienda y población
- 4.5. Turismo
- 4.6. Aspectos socio culturales

### V. RESULTADO

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

# GLOSARIO

## Glaciología

<b>Área de Ablación</b>	Es el área de un glaciar donde predominan los procesos que propician la pérdida de masa, por fusión o sublimación.
<b>Área de acumulación</b>	Es el área de un glaciar donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa, por precipitación en forma de nieve, redistribución eólica de la cubierta nival o avalanchas, donde las condiciones topográficas son favorables.
<b>Desglaciación</b>	Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña. Investigaciones recientes confirman la desglaciación en muchos lugares del mundo, incluyendo las zonas polares. En nuestro país se viene confirmando el registro de desglaciación en la Cordillera Blanca durante las últimas décadas.
<b>Glaciar</b>	Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes.
<b>Monitoreo</b>	Proceso de observación y seguimiento del desarrollo y variaciones de un fenómeno, ya sea instrumental o visualmente, y que podría generar un desastre.
<b>Morrenas</b>	Son acumulaciones de detritos que el glaciar tritura en su recorrido pendiente abajo y que los acumula en el frente glaciar y en sus flancos, denominándose morrena frontal, morrena lateral, morrena de fondo o morrena media.
<b>Movimiento glaciar</b>	Desplazamiento por efecto de la carga de nieve anual que tienen en la zona de acumulación, por gravedad de la constitución de su masa como un cuerpo semi plástico y por la pendiente misma del sub suelo, tienen un movimiento continuo cuya velocidad es diferente de acuerdo a su posición, potencia glaciar y altura.
<b>Valle glaciar</b>	Valle que muestra la acción de la erosión glaciar en su superficie y que puede o no tener glaciares en su parte superior.
<b>Variabilidad climática</b>	Estado medio del clima a escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa) (IPCC, 2014).
<b>Volcán</b>	Elevación conoidal de materiales volcánicos cuyo cráter está en comunicación con el foco magmático por medio de la chimenea, o del canal eruptivo; según la calidad de las masas eruptivas (lavas, cenizas, escorias) y el tipo de las erupciones, es posible distinguir varios tipos de volcanes.

## SIG y teledetección

<b>Albedo</b>	Razón entre la energía luminosa que difunde por reflexión una superficie y la energía incidente. Varía según la textura, color y la extensión de la superficie del objeto y se registra en porcentajes.
<b>Algoritmo</b>	Aplicado a los SIG suele tratarse de un conjunto de operaciones de álgebra de mapas y/o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica.
<b>Análisis multitemporal</b>	La comparación de imágenes satélite obtenidas a determinados intervalos de tiempo, permite estudiar fenómenos que implican una variación temporal, como por ejemplo el proceso de retroceso de glaciares.
<b>Anotación</b>	Texto descriptivo utilizado para etiquetar los elementos de una cobertura.
<b>Banda espectral</b>	Término que designa a una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.
<b>Cobertura</b>	Representa el principal modo de almacenamiento de datos vectoriales y describe un tipo de elemento de mapa, con sus datos localizables y atributos temático en un área dada.
<b>Coordenadas</b>	Cualquier sistema donde los puntos son definidos como una dirección o distancia específica de un punto de referencia medido con respecto a ejes definidos.
<b>Datum</b>	Elipsoide usado para representar matemáticamente la superficie de la Tierra.
<b>Escala</b>	Relación que existe entre el valor que el mapa está representando y el valor de la realidad de manera numérica.
<b>Espectro electromagnético:</b>	El espectro electromagnético es la organización de bandas de longitudes de onda o frecuencia desde las más cortas a las más largas.
<b>Firma espectral</b>	Es la forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Depende de las características físicas o químicas del objeto que interacciona con la energía electromagnética, y varía según las longitudes de onda.
<b>Fotografía aérea</b>	La fotografía es un sistema de percepción remota que utiliza la reflexión natural del sol, obtenidas desde un avión o un satélite, presentan variaciones de tono, textura, forma y patrones que corresponden a diferencias en rasgos y estructuras en la superficie.

<b>Geodatabase</b>	Nombre del modelo de base de datos geo-espacial definido por ESRI®.
<b>Geoprocesamiento</b>	Proceso en el que se aplica el análisis geográfico y se modelan los datos espaciales para producir nueva información.
<b>GPS (Global Position System)</b>	Un sistema de navegación satélite el cual continuamente transmite información concerniente a posiciones precisas de la tierra. Usado en trayectorias de vehículos y como recurso de información para entradas en bases de datos en Sistemas de Información Geográfica.
<b>Imagen de satélite</b>	Es una representación pictórica de la medición de energía electromagnética registrada por un sensor; y no por medios fotográficos. Ficheros ráster, formadas por una matriz regular o rejilla de celdas, a cada una de las cuales, denominada píxel (Picture Element, Elemento de Imagen), se le asigna un valor digital, que corresponde a la reflectividad recogida por el sensor.
<b>Imagen multiespectral</b>	Estructura de datos formada por varias imágenes digitales con las mismas propiedades geométricas, y cada una de las cuales recoge la reflectancia en un diferente rango de longitudes de onda del espectro electromagnético.
<b>Layer</b>	Capa o clase de datos geo-espaciales.
<b>Latitud</b>	Distancia de un lugar al ecuador, determinada por el arco de meridiano que va de dicho lugar al ecuador.
<b>Longitud</b>	Distancia angular, expresada en grados, que existe desde un punto cualquiera hasta el meridiano primero, paralelo al eje de la Tierra, cuyo valor es de cero grados.
<b>Modelo Digital de Elevación (MDE)</b>	Representación digital de la topografía de la Tierra. Los MDE permiten que la altura sea adicionada a una imagen, ofrece imágenes con efecto tridimensional.
<b>Número digital</b>	Valor numérico, por ejemplo entre 0 y 255, que se asigna a cada posición espacial de cuadrícula en el archivo que representa los niveles digitales de brillo de una imagen.
<b>Píxel</b>	Un píxel (picture element) es la menor unidad en la que se descompone una imagen digital. El píxel es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado.
<b>Puntos de control</b>	Puntos de control geográficos para una cobertura que representan localizaciones conocidas en la superficie de la tierra.

<b>Radiancia</b>	Total de energía radiada por unidad de superficie y por ángulo sólido de medida.
<b>Raster</b>	Modelo de datos de un SIG basado en las localizaciones espaciales sobre una retícula regular de puntos a los cuales se asigna el valor (por ejemplo: valores de elevación).
<b>Reflectancia</b>	Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie plana.
<b>Sistemas de Información Geográfica (SIG)</b>	Programas informáticos que proporcionan herramientas para el procesamiento, gestión, análisis y representación de datos con una componente cartográfica.
<b>Teledetección</b>	Técnica mediante la cual se obtiene información sobre la superficie de la Tierra, a través del análisis de los datos adquiridos por un sensor o dispositivo situado a cierta distancia, apoyándose en medidas de energía electromagnética reflejadas o emitidas.
<b>Toponimia</b>	Nombre que se da a un lugar.
<b>Vector</b>	Modelo de datos de un SIG basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.



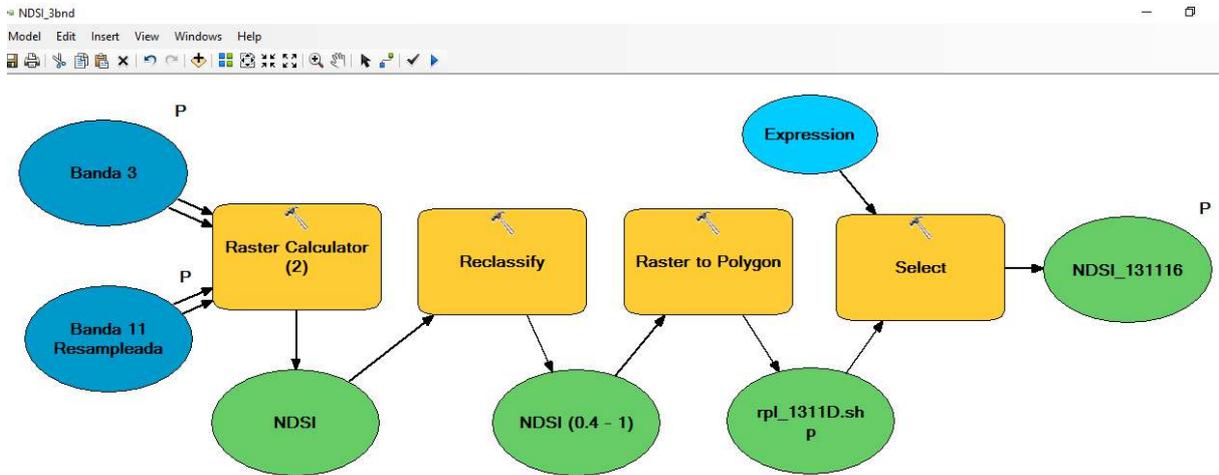
# BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, J.T. 1975. *Glacial systems. An approach to glaciers and their environments*. North Scituate. Duxbury Press. 191.
- Bijeesh, K., Sebastián, R. F., Shanshan, W., & Pedro, T. (2016). Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investig. Geogr. Chile.*, 51: 3-36.
- Burns, Patrick, and Anne Nolin. 2014. "Using Atmospherically-Corrected Landsat Imagery to Measure Glacier Area Change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010." *Remote Sensing of Environment* 140 (January). Elsevier B.V.: 165–78. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026.
- Dozier, Jeff. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing Environmental*. 28:9-22.
- Francou, Bernard, Mathias Vuille, Patrick Wagnon, Javier Mendoza, and Jean-Emmanuel Sicart. 2003. "Tropical Climate Change Recorded by a Glacier in the Central Andes during the Last Decades of the Twentieth Century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S." *Journal of Geophysical Research* 108 (D5): 4154. doi:10.1029/2002JD002959.
- Francou, B. y Pouyaud, B. 2004. *Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales*. 243.
- Francou, B. y Pouyaud, B. 2008. Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos? *Revista virtual Redesma*. 2: 9-17.
- Frank, R., Mauz, F., Singh Khalsa, S., & Raup, B. (2005). *Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual*.
- Frey, H., H. Machguth, M. Huss, C. Huggel, S. Bajracharya, T. Bolch, a. Kulkarni, a. Linsbauer, N. Salzmann, and M. Stoffel. 2014. "Estimating the Volume of Glaciers in the Himalayan–Karakoram Region Using Different Methods." *The Cryosphere* 8 (6): 2313–33. doi:10.5194/tc-8-2313-2014.
- Geoestudios LTDA, Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile. Santiago.
- IDEAM. (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá.
- Haeberli, Wilfried and, and Martin Hoelzle. 1995. "Application of Inventory Data for Estimation of Regional Climate Change Effects on Mountain Glaciers: A Pilot Study with the European Alps." *Annals of Glaciology* 21: 206–12.
- Kaser, Georg, and Henry Osmaston. 2002. *Tropical Glaciers*. International Hydrology Series. doi:10.1029/2002EO000287.
- Leet, L. y Judson, S. 1997. *Fundamentos de geología física*. Limusa. México.
- 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): F03007. doi:10.1029/2011JF002313.

- Marangunic, C. 2008. Manual de Glaciología. Volumen 2. Geoestudios LTDA, Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile. Santiago.  
. 2008b. Manual de Nieve y Nivometría. Notas de clase. Volumen 1.
- Mark, B. G., Seltzer, G. O., Rodbell, D. T., & Goodman, A. Y. 2002. Rates of Deglaciation during the Last Glaciation and Holocene in the Cordillera Vilcanota-Queelccaya Ice Cap Region, Southeastern Perú. *Quaternary Research*, 57(3), 287-298. doi: 10.1006/qres.2002.2320.
- Morales, B. (2014). *Volculario Técnico en Investigación en Glaciares / INAIGEM*. Huaraz: INAIGEM.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J. L. Ceballos, R. Basantes, et al. 2013. "Current State of Glaciers in the Tropical Andes: A Multi-Century Perspective on Glacier Evolution and Climate Change." *The Cryosphere* 7 (1): 81–102. doi:10.5194/tc-7-81-2013.
- Racoviteanu, A.E., Y . Arnaud, M.W. Williams, and J. Ordoñez. 2008. "Decadal Changes in Glacier Parameters in the Cordillera Blanca, Peru, Derived from Remote Sensing." *Journal of Glaciology* 54 (186): 499–510.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/igsoc/jog/2008/00000054/00000186/art00013>.
- Rice, R. J. 1982. *Fundamentos de geomorfología*. Paraninfo. Traducido por Guillermo Meléndez Hevia. Madrid.
- Rau, Frank, Fabian Mauz, Steffen Vogt, Siri Jodha, Singh Khalsa, and Bruce Raup. 2005. "Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual."
- Strahler, A. 1981. *Geografía física*. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Úbeda, J., 2010. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna (Cordillera occidental de los andes centrales). Memoria de Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, España.

# ANEXOS

**Anexo N° 1. Flujo de trabajo para el cálculo de la cobertura glaciar (NDSI).**



**Anexo N° 2. Formato de ficha de inspección de campo.**

## DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

NOMBRE DE LA UNIDAD ..... ACTIVIDAD: .....  
 HIDROGRAFICA .....  
 FECHA: ..... OBJETIVO: .....

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	DESCRIPCIÓN	N° DE FOTOGRAFÍAS	TOMA DE PUNTO DE CONTROL	OBSERVACIONES

## DESCRIPCIÓN DEL GLACIAR

NOMBRE DEL GLACIAR: ..... UBICACIÓN HIDROGRÁFICA: .....  
 FECHA: ..... OBJETIVO: .....

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	DESCRIPCIÓN	N° DE FOTOGRAFÍAS	OBSERVACIONES
Clasificación primaria			
Forma			
Características frontales			
Perfil longitudinal			
Fuente de alimentación			
Actividad de la lengua			
Morrena 1 (En contacto con glaciar)			
Morrena 2 (Sin contacto con glaciar)			
Lengua cubierta por detritos			





# MANUAL METODOLÓGICO DE INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES



Ministerio  
del Ambiente

Instituto Nacional de  
Investigación en Glaciares y  
Ecosistemas de Montaña - INAIGEM

