

**CALCULO DE RETROCESO PARA LOS GLACIARES COLOMBIANOS POR  
MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2 Y MDT PARA EL  
2016 - 2017**

**JOAN SEBASTIAN QUINTERO LONDOÑO**



**UNIVERSIDAD DE  
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2018**

**CALCULO DE RETROCESO PARA LOS GLACIARES COLOMBIANOS POR  
MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2 Y MDT PARA EL  
2016 - 2017**

**JOAN SEBASTIAN QUINTERO LONDOÑO**

**Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de  
Especialista en Sistemas de Información Geográfica**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
MANIZALES  
2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre por todo el apoyo incondicional en mi vida académica y profesional, gracias por todo lo que me ofreces.

A mi hija Isabella y a mi esposa Estefanía, ellas son la fuerza y el ánimo para salir adelante, ya que toda esta formación es para el futuro nuestro como familia.

A los profesionales del IDEAM Jorge Luis Ceballos Liévano y a Francisco Rojas Heredia por los grandes aportes que entregaron para la culminación de este trabajo.

Al IDEAM por la entrega de la información solicitada para realizar este proyecto.

Al PhD. Philipp Rastner por su valiosos aportes y colaboración en temas complejos.

A los profesores de la especialización por la paciencia y el conocimiento entregado.

## CONTENIDO

<b>1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
4.1. GLACIARES .....	4
4.1.1. RETROCESO GLACIAR .....	6
4.2. GLACIARES COLOMBIANOS .....	7
4.2.1. GLACIAR VOLCÁN NEVADO DEL HUILA (VNH).....	9
4.2.2. GLACIAR VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA (VNT) .....	11
4.2.3. GLACIAR VOLCÁN NEVADO SANTA ISABEL (VNSI) .....	13
4.2.4. GLACIAR VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ (VNR).....	15
4.2.5. GLACIAR SIERRA NEVADA DEL COCUY O GÜICÁN (SNCG).....	17
4.2.6. GLACIAR SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (SNSM) .....	19
4.3. MAPEO GLACIAR.....	21
4.3.1. SATÉLITE ÓPTICO SENTINEL 2.....	21
4.3.2. CALCULO DE ÁREA GLACIAR.....	24
4.4. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS .....	25
4.5. ANTECEDENTES .....	26
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>32</b>
5.1. FASE 1 - ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	32
5.1.1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL IDEAM.....	32
5.1.2. IMÁGENES SATELITALES .....	32
5.1.3. MODELO DE ELEVACIÓN DEL TERRENO.....	33
5.2. FASE 2 – PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	34
5.2.1. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES .....	34
5.2.2. DELIMITACIÓN ÁREA GLACIAR, CO-REGISTRACIÓN Y PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS.....	35
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>
6.1. ÁREA GLACIAR 2017 .....	41
6.1.1. ÁREA GLACIAR VNH .....	42
6.1.2. ÁREA GLACIAR VNT .....	43
6.1.3. ÁREA GLACIAR VNSI.....	44
6.1.4. ÁREA GLACIAR VNR .....	45
6.1.5. ÁREA GLACIAR SNCG.....	46
6.1.6. ÁREA GLACIAR SNSM.....	47
6.2. ÁREA GLACIAR MUNICIPIOS, CAR´S, PNN Y CUENCAS .....	48
6.2.1. ÁREA GLACIAR MUNICIPIOS.....	48
6.2.2. ÁREA GLACIAR CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES (CAR).....	56
6.2.3. ÁREA GLACIAR PARQUES NACIONALES NATURALES (PNN) .....	64
6.2.4. ÁREA GLACIAR SUBZONAS HIDROGRÁFICAS (CUENCAS).....	66
6.3. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS .....	74

6.3.1. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNH – 2017 .....	74
6.3.2. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNT – 2017 .....	77
6.3.3. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNSI – 2017 .....	78
6.3.4. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNR – 2017 .....	80
6.3.5. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR SNCG – 2017 .....	82
6.3.6. PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR SNSM – 2017 .....	85
<b><u>7. DISCUSIÓN.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
7.1. IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2 .....	87
7.2. ÁREA Y RETROCESO GLACIAR - AÑO 2017 .....	87
7.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL RETROCESO GLACIAR EN COLOMBIA .....	89
7.3.1. ELEVACIÓN.....	89
7.3.2. FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS .....	89
7.3.3. ACTIVIDAD VOLCÁNICA .....	90
<b><u>8. CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>92</u></b>
<b><u>9. RECOMENDACIONES .....</u></b>	<b><u>94</u></b>
<b><u>10. BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>95</u></b>
<b><u>11. ANEXOS.....</u></b>	<b><u>98</u></b>
11.1. ANEXO 1: METODOLOGÍA VISUALIZACIÓN IMÁGENES SENTINEL 2 (ERDAS) .....	98
11.2. ANEXO 2: METODOLOGÍA REMUESTREO (ERDAS) .....	100
11.3. ANEXO 3: METODOLOGÍA LAYER STACK (ERDAS).....	102
11.4. ANEXO 4: METODOLOGÍA DELIMITACIÓN ZONA DE INTERÉS (ERDAS) .....	106
11.5. ANEXO 5: METODOLOGÍA DELIMITACIÓN Y CALCULO DE ÁREA GLACIAR (ARCGIS)....	108
11.6. ANEXO 6: METODOLOGÍA CO-REGISTRACIÓN MDT.....	114
11.7. ANEXO 7: METODOLOGÍA CUENCAS GLACIARES.....	127
11.8. ANEXO 8: METODOLOGÍA PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS.....	136

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1:</b> Ciclo de formación del hielo glaciar (IDEAM, 2012).....	4
<b>Figura 2:</b> Esquema explicativo de las zonas de un glaciar (IDEAM, 2012). .....	5
<b>Figura 3:</b> Ubicación de los glaciares en el mundo (WGMS, 2017).....	6
<b>Figura 4:</b> Localización glaciares en el territorio colombiano. <b>A.</b> Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Huila (2017-04-04), <b>B.</b> Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Tolima (2017-02-03), <b>C.</b> Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado Santa Isabel (2017-06-03), <b>D.</b> Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Ruiz (2017-06-03), <b>E.</b> Imagen Sentinel 2 Sierra Nevada del Cocuy o Güicán (2017-12-22) y <b>F.</b> Imagen Sentinel 2 Sierra Nevada de Santa Marta (2017-12-25). Imágenes obtenidas de <a href="https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home">https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home</a> . .....	8
<b>Figura 5:</b> Localización VNH.....	9
<b>Figura 6:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el VNH. Información proporcionada por el IDEAM. ....	10
<b>Figura 7:</b> Localización VNT. ....	11
<b>Figura 8:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el VNT. Información proporcionada por el IDEAM. ....	12
<b>Figura 9:</b> Localización VNSI. ....	13
<b>Figura 10:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el VNSI. información proporcionada por el IDEAM. ....	14
<b>Figura 11:</b> Localización VNR. ....	15
<b>Figura 12:</b> Datos multitemporales de limite glaciar para el VNR. Información proporcionada por el IDEAM. ....	16
<b>Figura 13:</b> Localización SNCG. ....	17
<b>Figura 14:</b> Datos multitemporales de Limite glaciar para el SNCG. Información proporcionada por el IDEAM. ....	18
<b>Figura 15:</b> Localización SNSM. ....	19
<b>Figura 16:</b> Datos multitemporales de Limite glaciar para el SNSM. Información proporcionada por el IDEAM. ....	19
<b>Figura 17:</b> Bandas espectrales y resolución espacial asociada, para la misión Sentinel 2 (Müller et al. 2016). ....	21
<b>Figura 18:</b> Niveles de procesamiento productos Sentinel 2 (Modificado de ESA, 2015).....	23
<b>Figura 19:</b> Curvas de reflectancia para diferentes coberturas, en donde se observa los cambios de reflectancia para las bandas espectrales b4 (VIS) y b11 (SWIR) de Sentinel 2 (Tomado y Modificado de Kulkarni, 2007). ....	25
<b>Figura 20:</b> Interfaz plataforma Copernicus <a href="https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home">https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home</a> . ....	33
<b>Figura 21:</b> Interfaz plataforma LP DAAC ( <a href="https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/">https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/</a> ). ....	34
<b>Figura 22:</b> Nivel de procesamiento de las imágenes Sentinel 2. El recuadro rojo es el nivel con la que se puede adquirir las imágenes (ESA, 2015). ....	35
<b>Figura 23:</b> Disposición de las bandas según la longitud de onda para Sentinel 2 (recuadro azul) (Kaab et al. 2016). Las bandas a utilizar en el trabajo son 2, 3, 4, 8 (10m - VNIR) y 11 (20m – SWIR).....	36

<b>Figura 24:</b> Reflectancia y transmisión atmosférica de algunas coberturas terrestres y relación con las bandas espectrales a trabajar (Modificado de Egbers, 2016).....	36
<b>Figura 25:</b> Reflectancias de las superficies de nieve y hielo en el espectro visible y en el infrarrojo cercano (Bippus, 2011). .....	36
<b>Figura 26: A.</b> Banda 4 (VIS), se puede observar la alta reflectancia de la superficie glaciar. <b>B.</b> Banda 11 (SWIR), se puede observar la nula reflectancia de la superficie glaciar. ....	38
<b>Figura 27:</b> Área y retroceso glaciar para el VNH comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	42
<b>Figura 28:</b> Área y retroceso glaciar para el VNT comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	43
<b>Figura 29:</b> Área y retroceso glaciar para el VNSI comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	44
<b>Figura 30:</b> Área y retroceso glaciar para el VNR comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	45
<b>Figura 31:</b> Área y retroceso glaciar para el SNCG comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	46
<b>Figura 32:</b> Área y retroceso glaciar para el SNSM comprendido entre los periodos 2016 y 2017. ....	47
<b>Figura 33:</b> Valores de área glaciar para el VNH para los municipios de Páez, Planadas y Teruel para el periodo 1850 - 2017.....	49
<b>Figura 34:</b> Valores de área glaciar para el VNT para los municipios de Anzoátegui e Ibagué para el periodo 1850 - 2017. ....	50
<b>Figura 35:</b> Valores de área glaciar para el VNSI para los municipios de Villamaría, Pereira, Santa Rosa de Cabal, Murillo y Santa Isabel para el periodo 1850 - 2017. ....	51
<b>Figura 36:</b> Valores de área glaciar para el VNR para los municipios de Villamaría, Villahermosa, Murillo, Herveo y Casabianca para el periodo 1850 - 2017.....	53
<b>Figura 37:</b> Valores de área glaciar para la SNCG para los municipios de Güicán, Tame y Chiscas para el periodo 1850 - 2017. ....	54
<b>Figura 38:</b> Valores de área glaciar para la SNSM para los municipios de Aracataca, Santa Marta, Valledupar, Dibulla y Ciénaga para el periodo 1850 - 2017. ....	56
<b>Figura 39:</b> Valores de área glaciar del VNH para CRC, CAM y CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017. ....	58
<b>Figura 40:</b> Valores de área glaciar del VNT para CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017. ....	59
<b>Figura 41:</b> Valores de área glaciar del VNSI para CORTOLIMA, CORPOCALDAS y CARDER para el periodo 1996 - 2017.....	60
<b>Figura 42:</b> Valores de área glaciar del VNR para CORTOLIMA y CORPOCALDAS para el periodo 1996 - 2017. ....	61
<b>Figura 43:</b> Valores de área glaciar de la SNCG para CORPOBOYACA y CORPORINOQUIA para el periodo 1994 - 2017.....	62
<b>Figura 44:</b> Valores de área glaciar de la SNSM para CORPAMAG, CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR para el periodo 1995 - 2017. ....	64

<b>Figura 45:</b> Área glaciár del VNH para la cuenca del Río Páez para el periodo 1850 - 2017.....	66
<b>Figura 46:</b> Comparación área glaciár del VNT por año para las cuencas del Río Totare y Río Coello para el periodo 1850 - 2017.....	67
<b>Figura 47:</b> Comparación área glaciár del VNSI por año para las cuencas del Río Chinchiná, Río Lagunilla, Río Otún y Río Totare para el periodo 1850 - 2017. ....	69
<b>Figura 48:</b> Comparación área glaciár del VNR por año para las cuencas del Río Chinchiná, Río Gualí y Río Lagunilla para el periodo 1850 - 2017. ....	70
<b>Figura 49:</b> Comparación área glaciár de la SNCG por año para las cuencas del Río Bojabá, Río Casanare, Río Chicamocha y Río Cobugón - Río Cobaría para el periodo 1850 - 2017.....	72
<b>Figura 50:</b> Comparación área glaciár de la SNSM por año para las cuencas del Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho y Río Don Diego para el periodo 1850 - 2017.....	74
<b>Figura 51:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár VNH (2017).....	76
<b>Figura 52:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár VNT (2017). ....	77
<b>Figura 53:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár VNSI (2017).....	79
<b>Figura 54:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár VNR (2017).....	81
<b>Figura 55:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár SNCG (2017).....	84
<b>Figura 56:</b> Cuencas glaciáres para el glaciár SNSM (2017).....	86
<b>Figura 57:</b> Balance de Masa Anual y Acumulado del Glaciár Sierra Nevada de El Cocuy o Güicán (IDEAM, 2018).....	89
<b>Figura 58:</b> Glaciár VNSI con depósitos de ceniza provenientes de la actividad efusiva del VNR (IDEAM, 2018).....	90
<b>Figura 59:</b> Capa de ceniza con un espesor aproximadamente entre 15 a 20 cm sobre el glaciár VNR (IDEAM, 2018).....	91

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1:</b> Área glaciar Colombia año 2016. Datos proporcionados por el IDEAM. ..	7
<b>Tabla 2:</b> Datos multitemporales de limite glaciar para el VNH. Información proporcionada por el IDEAM. ....	10
<b>Tabla 3:</b> Datos multitemporales de limite glaciar para el VNT. Información proporcionada por el IDEAM. ....	12
<b>Tabla 4:</b> Datos multitemporales de limite glaciar para el VNSI. Información proporcionada por el IDEAM. ....	14
<b>Tabla 5:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el VNR. Información proporcionada por el IDEAM. ....	16
<b>Tabla 6:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el SNCG. Información proporcionada por el IDEAM. ....	18
<b>Tabla 7:</b> Datos multitemporales de área glaciar para el SNSM. Información proporcionada por el IDEAM. ....	20
<b>Tabla 8:</b> Características de resolución espacial, radiométrica, temporal y espectral de la misión Sentinel 2 (ESA, 2015). ....	22
<b>Tabla 9:</b> Parámetros topográficos para zonas glaciares según el inventario glaciar propuesto por WGMS y GLIMS (Paul et al. 2009). ....	25
<b>Tabla 10:</b> Imágenes seleccionadas para cada glaciar con fecha de adquisición en temporadas secas. ....	33
<b>Tabla 11:</b> Recopilación de los parámetros topográficos a identificar para cada uno de los glaciares (Paul et al. 2010). ....	40
<b>Tabla 12:</b> Área para cada superficie glaciar del año 2017 y retroceso glaciar con respecto al año 2016. ....	41
<b>Tabla 13:</b> Área glaciar VNH para los municipios de Páez, Planadas y Teruel para el periodo 1850 - 2017. ....	48
<b>Tabla 14:</b> Área glaciar VNT para los municipios de Anzoátegui e Ibagué para el periodo 1850 - 2017. ....	49
<b>Tabla 15:</b> Área glaciar VNSI para los municipios de Villamaria, Pereira, Santa Rosa de Cabal, Murillo y Santa Isabel para el periodo 1850 - 2017. ....	51
<b>Tabla 16:</b> Área glaciar VNR para los municipios de Villamaría, Villahermosa, Murillo, Herveo y Casabianca para el periodo 1850 - 2017. ....	52
<b>Tabla 17:</b> Área glaciar SNCG para los municipios de Tame, Chiscas y Güicán para el periodo 1850 - 2017. ....	54
<b>Tabla 18:</b> Área glaciar de la SNSM para los municipios de Valledupar, Dibulla, Santa Marta, Ciénaga y Aracataca para el periodo 1850 - 2017. ....	55
<b>Tabla 19:</b> Área glaciar del VNT para CAM, CRC y CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017. ....	57
<b>Tabla 20:</b> Área glaciar del VNT para CORTOLIMA en el periodo 1996 - 2017. ....	58
<b>Tabla 21:</b> Área glaciar del VNSI para CORTOLIMA, CORPOCALDAS y CARDER en el periodo 1996 - 2017. ....	60
<b>Tabla 22:</b> Área glaciar del VNR para CORTOLIMA y CORPOCALDAS en el periodo 1996 - 2017. ....	61
<b>Tabla 23:</b> Área glaciar de la SNCG para CORPOBOYACA y CORPORINOQUIA en el periodo 1994 - 2017. ....	62

<b>Tabla 24:</b> Área glaciar de la SNSM para CORPAMAG, CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR en el periodo 1995 - 2017. ....	63
<b>Tabla 25:</b> Valores de área glaciar para cada PNN por año. ....	65
<b>Tabla 26:</b> Datos de área glaciar del VNH para la cuenca del Río Páez comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	66
<b>Tabla 27:</b> Datos de área glaciar del VNT para las cuencas del Río Coello y el Río Totare comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	67
<b>Tabla 28:</b> Datos de área glaciar del VNSI para las cuencas del Río Chinchiná, Río Lagunilla y otros directos al Magdalena, Río Otún y otros directos al Cauca y el Río Totare comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	68
<b>Tabla 29:</b> Datos de área glaciar del VNR para las cuencas del Río Chinchiná, Río Gualí y Río Lagunilla comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	70
<b>Tabla 30:</b> Datos de área glaciar de la SNCG para las cuencas del Río Bojabá, Río Casanare, Río Chicamocha y Río Cobugón - Río Cobaría comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	71
<b>Tabla 31:</b> Datos de área glaciar de la SNSM para las cuencas del Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho y Río Don Diego comprendido en el periodo 1850 - 2017. ....	73
<b>Tabla 32:</b> Parámetros topográficos glaciar VNH (2017). ....	75
<b>Tabla 33:</b> Parámetros topográficos glaciar VNT (2017). ....	77
<b>Tabla 34:</b> Parámetros topográficos glaciar VNSI (2017). ....	78
<b>Tabla 35:</b> Parámetros topográficos glaciar VNR (2017). ....	80
<b>Tabla 36:</b> Parámetros topográficos glaciar SNCG (2017). ....	83
<b>Tabla 37:</b> Parámetros topográficos glaciar SNSM (2017). ....	86
<b>Tabla 38:</b> Relación bandas por separado y el layer stack multibanda.....	104

## GLOSARIO

**SENSORES REMOTOS:** Es un sistema de detección y medida a distancia, generalmente empleados desde aeronaves o satélites, con los que se obtiene información meteorológica, oceanográfica, sobre la cubierta vegetal, etc. Para tales medidas se utilizan sistemas de detección activos y pasivos.

**IMAGEN SATELITAL:** Es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste, producto que posteriormente se transmite a estaciones terrenas para su visualización, procesamiento y análisis.

**SENTINEL 2:** Es una misión de observación terrestre desarrollada por la ESA (European Spacial Agency) dentro del programa Copérnico para desarrollar observaciones del planeta tierra para dar servicios como el seguimiento de la evolución de los bosques, cambios en la corteza terrestre y la gestión de desastres naturales. Este compuesto por dos satélites idénticos, el Sentinel 2<sup>a</sup> y el Sentinel 2B.

**ESPECTRO ELECTROMAGNETICO:** Se conoce como espectro electromagnético al rango que cubre todas las longitudes de ondas. Desde las ondas de longitud corta, como los rayos x, pasando por la luz visible para el ojo humano, hasta las ondas de longitud larga, como las de radio.

**BANDAS ESPECTRALES:** Se conoce como banda espectral a un grupo de longitudes de ondas. Estas son: Ultravioleta, Infrarrojo, Microondas, Visible, etc.

**RESOLUCIÓN ESPACIAL:** Es el objeto más pequeño que se puede distinguir sobre una imagen.

**RESOLUCIÓN ESPECTRAL:** Indica el número y ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

**RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA:** Es la sensibilidad del sensor, esto es, su capacidad para detectar variaciones de la energía que recibe.

**RESOLUCIÓN TEMPORAL:** Periodicidad con que el sensor adquiere una imagen de la misma porción de la superficie terrestre.

**ARCGIS:** Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

**ERDAS IMAGINE:** Erdas Imagine es un paquete de software de procesamiento de imágenes que permite a los usuarios procesar imágenes geoespaciales y de otro tipo, así como datos vectoriales. Erdas también puede manejar imágenes hiperespectrales y LiDAR de varios sensores.

**DEM:** Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

**SRTM:** La Misión Topográfica Shuttle Radar (acrónimo en inglés *SRTM*, de *Shuttle Radar Topography Mission*) es un sistema de radar especialmente modificado que permite obtener datos de elevación topográfica para la generación de Modelos de Elevación del Terreno con resolución espacial de 30 mt o 90 mt.

**ASTER:** Es un instrumento radiométrico, el cual este abordo de un sistema satelital denominado TERRA. Aster es el Modelo de Elevación del Terreno más preciso en la actualidad, tiene una resolución espacial de 15 mt a 90 mt.

**GLACIAR:** Se define como una masa de hielo superficial que bajo los efectos de la gravedad fluye en dirección de la pendiente y se ve limitada por la tensión interna y la fricción que ocurre en su base y sus costados, donde la formación de estos es producto de la acumulación de nieve por largos periodo de tiempo a grandes altitudes (WGMS, 2007).

**RETROCESO GLACIAR:** La pérdida de masa glaciario producto del desequilibrio de las zonas de acumulación y ablación por efectos atmosféricos o bien sea por comportamiento geológico local (vulcanismo).

**ALBEDO:** El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

**PARAMETROS TOPOGRAFICOS:** Son las características de las superficies glaciares que permiten determinar el comportamiento de estos cuerpos (Paul et al. 2009)

**MULTITEMPORAL:** Es una evaluación de los cambios que sufrió algún elemento a través del tiempo.

## **RESUMEN**

El presente trabajo se realizó a partir de datos proporcionados por el IDEAM y de metodologías empleadas para delimitación glaciaria a partir de imágenes satelitales Sentinel 2, con el fin de determinar el área glaciaria y su respectivo retroceso. Por otro lado, a partir de Modelos de Elevación del Terreno, se procede a calcular parámetros topográficos como elevaciones máximas y mínimas, pendientes y aspecto u orientación, todo esto como información complementaria para la actualización del inventario glaciario en Colombia.

Inicialmente se utilizó una metodología para determinar el área de los seis glaciares colombianos que actualmente existen, todo esto a partir de imágenes satelitales y software SIG, todo esto para el periodo 2016 – 2017. Adicionalmente como información complementaria se determinó el área glaciaria para ciertas jurisdicciones como Municipios, Corporaciones Autónomas Regionales, Parques Nacionales Naturales y Subzonas Hidrográficas o Cuencas y determinar el comportamiento de los glaciares para cada uno en un rango de 167 años (1850 – 2017).

Los resultados obtenidos de área para cada uno de los glaciares evidencian un claro retroceso, que para algunos de los glaciares es un dato significativo como es el caso del glaciar del VNSI el cual tuvo un retroceso entre los años 2016 y 2017 de aproximadamente 36.16%, seguido por el glaciar del VNT 8.5%, glaciar del VNR con 7%, glaciar de la SNSM con 6.3%, glaciar de la SNCG con 4.1% y por último el glaciar del VNH con un 2.3%.

**PALABRAS CLAVES:** SIG, Glaciar, VNH, VNT, VNSI, VNR, SNCG, SNSM, Área, Retroceso, Sentinel 2.

## **ABSTRACT**

The present work was carried out from data provided by the IDEAM and from methodologies used for glacial delimitation from Sentinel 2 satellite images, in order to determine the glacier area and its respective retreat. On the other hand, from Terrain Elevation Models, we proceed to calculate topographic parameters such as maximum and minimum elevations, slopes and aspect or orientation, all this as complementary information for the updating of the glacier inventory in Colombia.

Initially a methodology was used to determine the area of the six Colombian glaciers that currently exist, all this from satellite images and GIS software, all this for the period 2016 - 2017, additionally as complementary information the glacier area was determined for certain jurisdictions as Municipalities, Regional Autonomous Corporations, National Natural Parks and Hydrographic Subzones or Watersheds and determine the behavior of the glaciers for each in a range of 167 years (1850 - 2017).

The results obtained from the area for each of the glaciers show a clear setback, which for some of the glaciers is a significant fact, as is the case of the VNSI glacier, which had a setback between 2016 and 2017 of approximately 36.16%. followed by the VNT glacier 8.5%, the VNR glacier with 7%, the SNSM glacier with 6.3%, the SNCG glacier with 4.1% and finally the VNH glacier with 2.3%.

**KEY WORDS:** GIS, Glacier, VNH, VNT, VNSI, VNR, SNCG, SNSM, Area, Retreat, Sentinel 2, DEM.

## INTRODUCCIÓN

A través de la problemática del cambio climático por la que atraviesa el planeta tierra, los glaciares han sido y son las superficies más susceptibles y que peores efectos han sufrido, ya que el derretimiento de estas masas se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas, para esto instituciones a nivel mundial se han encargado de monitorear el comportamiento de estas superficies a través de los años por medio de tecnologías tanto terrestres como espaciales que les han permitido medir estos cambios e incluso determinar la evolución de estos a futuro.

Una de estas instituciones que a nivel mundial se ha encargado del monitoreo constante y actualización de los datos de los glaciares en el mundo es la World Glacier Monitoring Service o WGMS, esta institución en conjunto con un número considerable de otras entidades lidera el monitoreo mundial de estas superficies, con el fin de concientizar a la comunidad de la importancia y el peligro que corren los glaciares.

Uno de los principales efectos negativos que presentan los glaciares son el retroceso o derretimiento desmedido producto por la alta radiación que interactúa sobre estas superficies, quizás este sea el efecto más devastador y más común que se presenta, además de otras condiciones locales que puedan afectar el comportamiento natural de los glaciares.

Asociado a lo anterior muchas instituciones buscaron la forma de como monitorear y principalmente medir este retroceso de forma exacta y eficaz, para lo cual utilizaron muchas herramientas y diversas metodologías con el fin de cuantificar este cambio, donde los Sistemas de Información Geográfica y las tecnologías espaciales como sensores ópticos entran a jugar un papel de mucha importancia para esta labor. A partir de software especializado e imágenes satelitales de estas superficies en conjunto con metodologías ampliamente estudiadas, se da un importante paso para el estudio de estas superficies de forma remota.

En caso concreto, los glaciares colombianos están siendo monitoreados por el IDEAM, el cual es la institución encargada de velar por el seguimiento de los glaciares que actualmente posee Colombia, los cuales en su totalidad son seis y por ende estos pertenecen a la red de monitoreo mundial de la WGMS.

Latitudinalmente los glaciares colombianos se denominan tropicales, pero por su posición geográfica se denominan tropicales andinos. De entrada, estos glaciares ya son especiales, ya que por su ubicación latitudinal los hace únicos por la gran variabilidad e inestabilidad que han presentado durante el correr de los años, destacándolos de manera notoria.

Para el IDEAM estas masas son grandes laboratorios, en los cuales han podido observar cómo se ha sido la evolución de estos a través de los años, utilizando herramientas como imágenes satelitales de alta resolución y software SIG

especializado, demostrando de manera cuantitativa el impactante cambio que han sufrido y que podrían sufrir a futuro.

En conjunto con el IDEAM, el presente trabajo se encamina principalmente a actualizar el área glaciar de Colombia para el año 2017, a partir de imágenes satelitales Sentinel 2, con el fin de calcular el retroceso con respecto al año 2016, complementando esta información con aspectos topográficos para cada glaciar como lo exige la WGMS.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Alrededor del mundo se han realizado muchos estudios sobre el impacto que han sufrido los glaciares en los últimos años, producto principalmente del cambio climático, para lo cual el IDEAM es la entidad colombiana encargada de realizar el seguimiento a la evolución de estos cuerpos glaciares año a año en el territorio colombiano, por lo cual para la entidad es de vital importancia tener lo más actualizado posible toda la información de estas superficies.

Las metodologías utilizadas por medio de imágenes satelitales y modelos de elevación del terreno son ampliamente utilizadas para determinar todos los parámetros evolutivos de estos cuerpos, por lo que se convierten en herramientas de gran utilidad para el presente trabajo, a lo cual, con esta información se quiere detallar mucho más sobre la espacialidad de estos cuerpos en el territorio colombiano.

Para lo anterior instituciones como la WGMS (World Glacier Monitoring Service) proponen metodologías por medio de imágenes satelitales y modelos de elevación del terreno para la visualización temporal y espacial de estos cuerpos, por lo cual el IDEAM se acoge a estas metodologías para actualizar y monitorear estas superficies glaciares en el territorio colombiano.

El monitoreo y actualización de esta información da una idea de la evolución a largo plazo de la dinámica de estos cuerpos, los cuales son de gran interés por su clara ubicación geográfica demostrando una clara importancia tanto ambiental como social.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

- Determinar por medio de imágenes satelitales Sentinel 2 y Modelos de Elevación del Terreno el retroceso de los glaciares colombianos para el periodo 2016 – 2017.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Actualizar la información de área glaciario para el año 2017 de todas las superficies glaciares en Colombia.
- Determinar el área glaciario para cada Municipio, Parques Nacionales Naturales (PNN), Corporación Autónoma Regional (CAR) y Subzonas Hidrográficas (Cuencas) que posean superficies glaciares.
- Identificar parámetros topográficos por cuencas glaciares para el año 2017.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El monitoreo del retroceso de las superficies glaciares es ampliamente estudiado alrededor del mundo desde que se ha venido presentado un cambio climático en todo el planeta debido a la alta cantidad de gases invernadero, produciendo anomalías naturales las cuales poco a poco van cambiando la superficie terrestre. Asociado a lo anterior, esta pérdida de cobertura glaciar ha desencadenado una serie de sucesos adversos en la naturaleza por lo que es de vital importancia el monitoreo y registro de estos cambios, con el fin de observar cómo será la evolución glaciar a largo plazo, por lo que instituciones a nivel mundial como la WGMS y a nivel nacional como el IDEAM la cual es la encargada de realizar el seguimiento de los seis glaciares colombianos que aún existen en la actualidad, donde año tras año por medio de herramientas como imágenes satelitales, modelos de elevación del terreno y software especializado, pueden determinar parámetros que ayudan a generar bases de datos con toda la información registrada de estos cambios, con el fin de realizar análisis multitemporales que son de gran ayuda para determinar cómo será la evolución glaciar.

Los glaciares colombianos están situados en el eje de la cordillera andina, cuatro en la cordillera central, uno en la cordillera oriental y uno al norte del país en el complejo ígneo – metamórfico de la Sierra Nevada de Santa Marta, su ubicación los hace especiales por lo que se les denomina glaciares tropicales andinos, gracias a su compleja ubicación estos han sufrido un retroceso muy marcado en las últimas décadas por lo que se hace importante el monitoreo detallado de dicho retroceso para la actualización de la información presente en el IDEAM.

Asociado a lo anterior, se hace de vital importancia acogerse a herramientas como imágenes satelitales (Sentinel 2), Modelos de Elevación del Terreno (SRTM y ASTER GDEM2) y técnicas de mapeo de cobertura glaciar, la identificación de todos los parámetros espaciales y topográficos de estas superficies, con el fin de actualizar la información por medio de metodologías propuestas por instituciones especializadas en el tema como la WGMS.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Glaciares

Según el Servicio de Mundial de Monitoreo Glaciar (WGMS por sus siglas en inglés), un glaciar se define como una masa de hielo superficial que bajo los efectos de la gravedad fluye en dirección de la pendiente y se ve limitada por la tensión interna y la fricción que ocurre en su base y sus costados, donde la formación de estos es producto de la acumulación de nieve por largos periodo de tiempo a grandes altitudes (WGMS, 2007).

Por otro lado, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) definen un glaciar como una masa de hielo en movimiento que incluye detritos rocosos y se caracteriza por el balance entre la acumulación y la ablación, donde es dependiente de las condiciones atmosféricas presentes adquiriendo un comportamiento dinámico por lo que sus componentes y funcionamiento cambia con el transcurso del tiempo (IDEAM, 2012).

La formación de estas superficies es cíclica, esto comienza desde una precipitación sólida producto de alteraciones atmosféricas que generan cambios de estado del agua provocando un congelamiento (líquido a sólido) o sublimación inversa (gaseoso a sólido), donde el actuar de estos procesos se evidencia en la caída de granizo y nieve en la superficie. Una vez depositada la nieve el cual son cristales de hielo, sobre la superficie (ya sea roca o suelo) una y otra vez, se van formando capas (mantos de nieve), el cual presenta espesores diferentes dependiendo de la intensidad de la precipitación sólida. Una vez formadas las capas, cada una de ellas ejerce presión sobre las capas inferiores, donde los cristales de hielo se compactan reduciendo los espacios de aire y agua formando lo que se denomina nieve granular y neviza. La neviza va adquiriendo más densidad a medida que la nieve cae a la superficie, por lo que con el transcurrir del tiempo se va formando el hielo glaciar (Figura 1). El hielo glaciar puede presentar tanto tonalidades blancas como tonalidades azules, estos son dependiente del tiempo de formación, por lo cual hielo glaciar con tonalidades blancas es más reciente que el hielo con tonalidades azules (IDEAM, 2012).

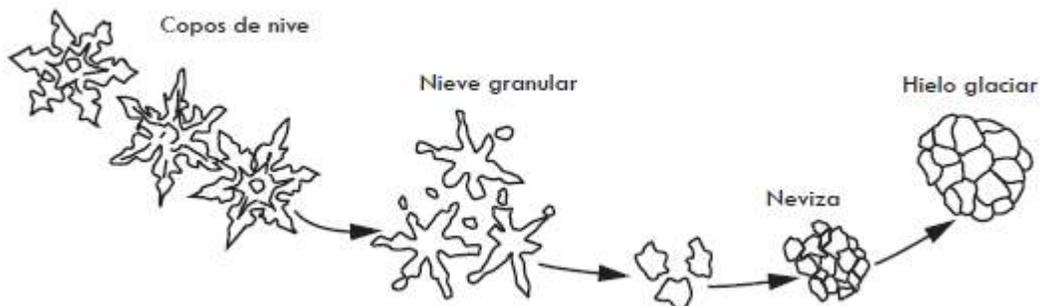


Figura 1: Ciclo de formación del hielo glaciar (IDEAM, 2012).

Si bien, una vez ya está formado el glaciar, este presenta comportamientos que hacen parte de su dinámica natural, para lo cual existen zonas que marcan estos comportamientos. Uno es llamado la Zona de Acumulación, esta zona es donde el cuerpo glaciar tiene ganancia de masa, generalmente es la zona más alta del glaciar donde se acumula la nieve que se precipita, contrario a esto, la Zona de Ablación es donde el glaciar pierde masa y ocurren procesos de fusión y evaporación formando pequeños drenajes que abastecen los ríos. Estas dos zonas están divididas por la Línea de Equilibrio, acá la pérdida y la ganancia son iguales (Figura 2). Estas zonas definen el comportamiento dinámico del glaciar con el paso del tiempo, todo dependiendo de los cambios atmosféricos de la época, a lo que vienen temas como periodos glaciales donde hay un descenso de la temperatura y periodos interglaciales donde se presenta un ascenso en la temperatura (IDEAM, 2012; Alpala, 2016).

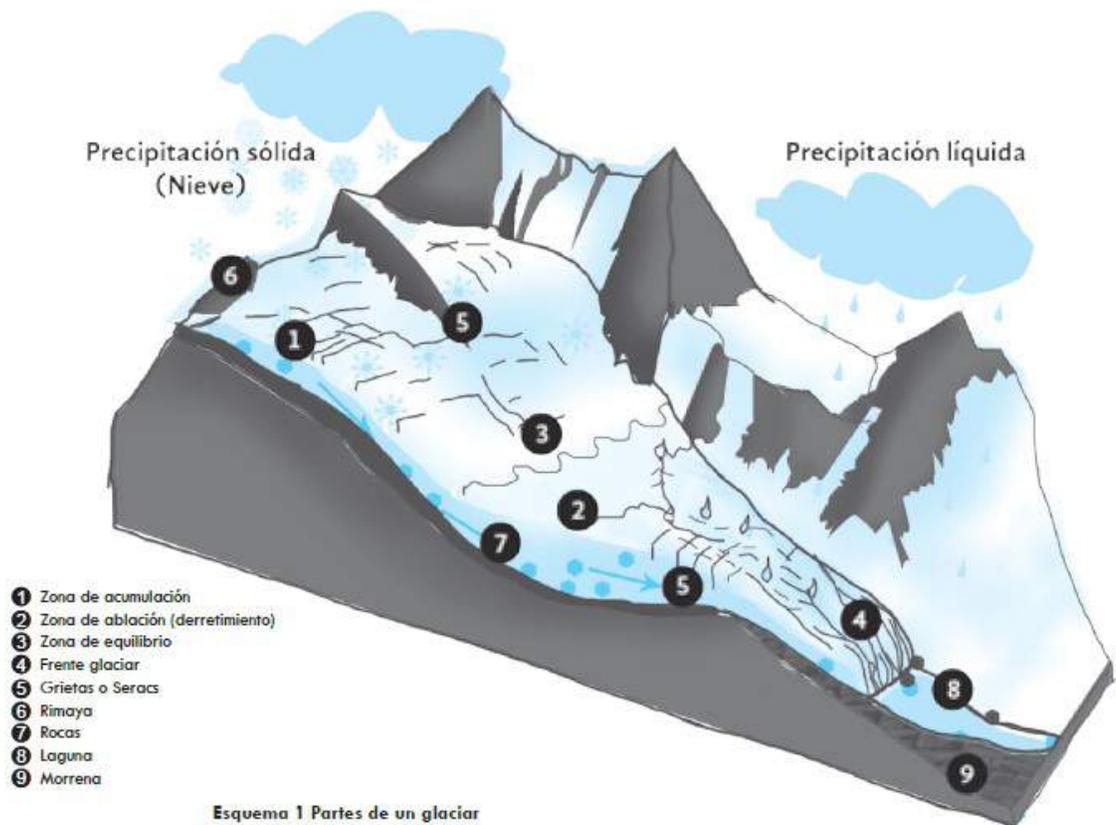


Figura 2: Esquema explicativo de las zonas de un glaciar (IDEAM, 2012).

Generalmente, la ubicación de estas masas de hielo en el mundo está relacionadas con las altas latitudes, allí es donde se observan los glaciares de gran magnitud y extensión, pero también se puede observar pequeñas áreas glaciares en zonas tropicales, estos están en función de la altura en la que se encuentran, caso Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia (Figura 3). Estos glaciares que tipológicamente hablando se clasificarían intertropicales internos (glaciares colombianos) y externos, esto dependiendo de la ubicación del glaciar con respecto a los trópicos y a la línea del ecuador (IDEAM, 2012).

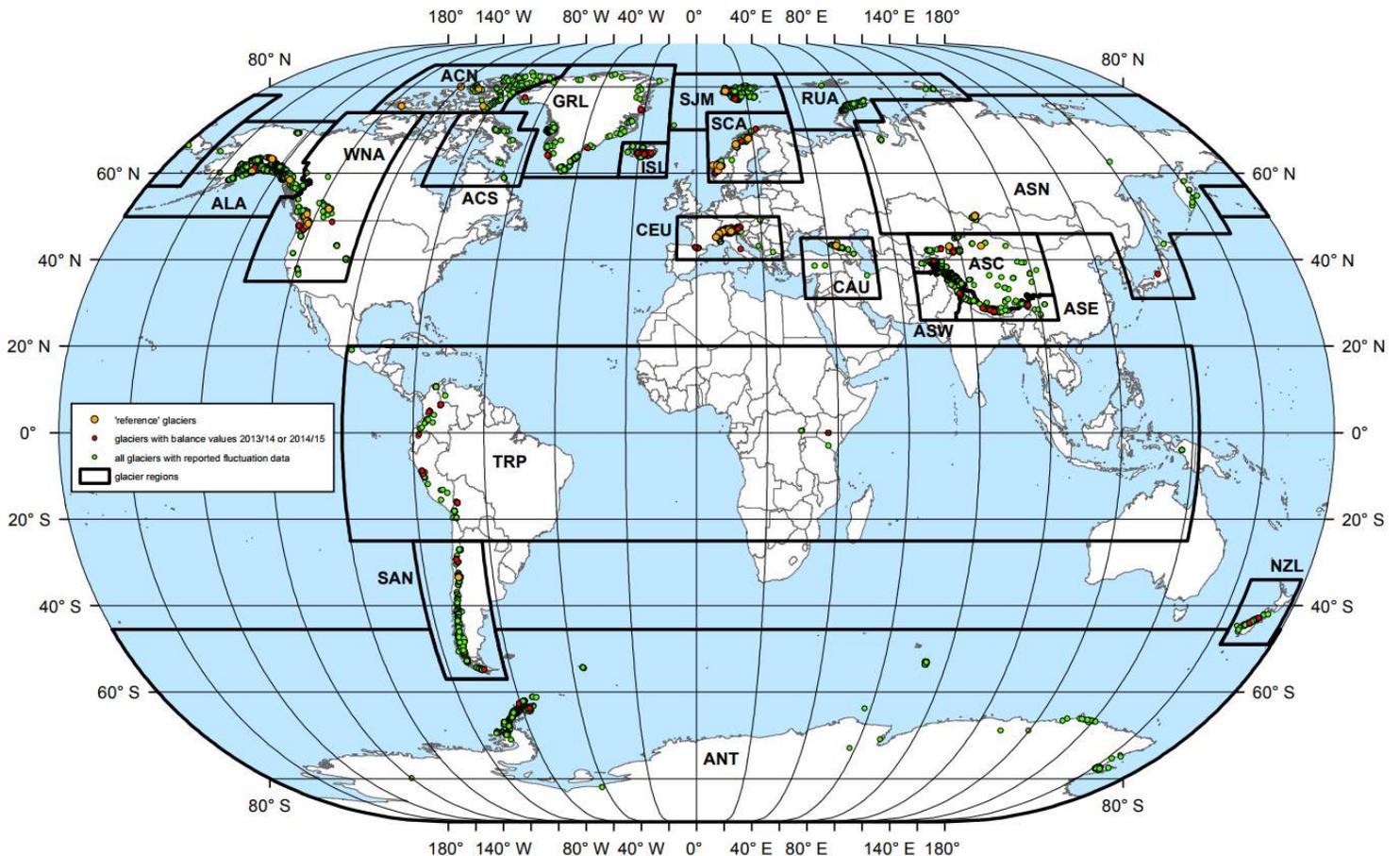


Figura 3: Ubicación de los glaciares en el mundo (WGMS, 2017).

#### 4.1.1. Retroceso Glaciar

Si bien el cambio climático afecta muchos ecosistemas en la superficie terrestre, por las altas temperaturas provocados por factores antropogénicos que producen gases de efecto invernadero (Pabón, 2003), las masas glaciares son una de las superficies terrestres con más impacto por el ascenso de las temperaturas, provocando un comportamiento no habitual en ellos, este comportamiento se denomina retroceso glaciar (Ceballos y Tobón, 2007; IDEAM, 2012; Alpala, 2016), el cual se define a groso modo como la pérdida de masa glaciar producto del

desequilibrio de las zonas de acumulación y ablación por efectos atmosféricos o bien sea por comportamiento geológico local (vulcanismo).

Los glaciares tienen un papel fundamental en la hidrología, ya que una de sus funciones es el abastecimiento de cuencas hidrográficas por medio de fusión glaciaria, por lo que su comportamiento natural es vital, contrario a lo que ha venido pasando en las últimas décadas producto de todos los cambios atmosféricos provocando mayor ablación y menor acumulación. Si bien los glaciares son importantes para la hidrología, también tienen consecuencias directas, como el aumento del nivel del mar producto de la fusión acelerada de estas superficies (IDEAM, 2012).

## 4.2. Glaciares Colombianos

Para el año 2008, el programa de las Naciones Unidas (UNEP por sus siglas en inglés), calcula que a nivel global el área glaciaria es aproximadamente de 684.294 km<sup>2</sup>, donde para Suramérica el área glaciaria es de 25.500 km<sup>2</sup>, lo que en porcentaje es un 3.7% con respecto al área glaciaria global (UNEP, 2008; IDEAM, 2012).

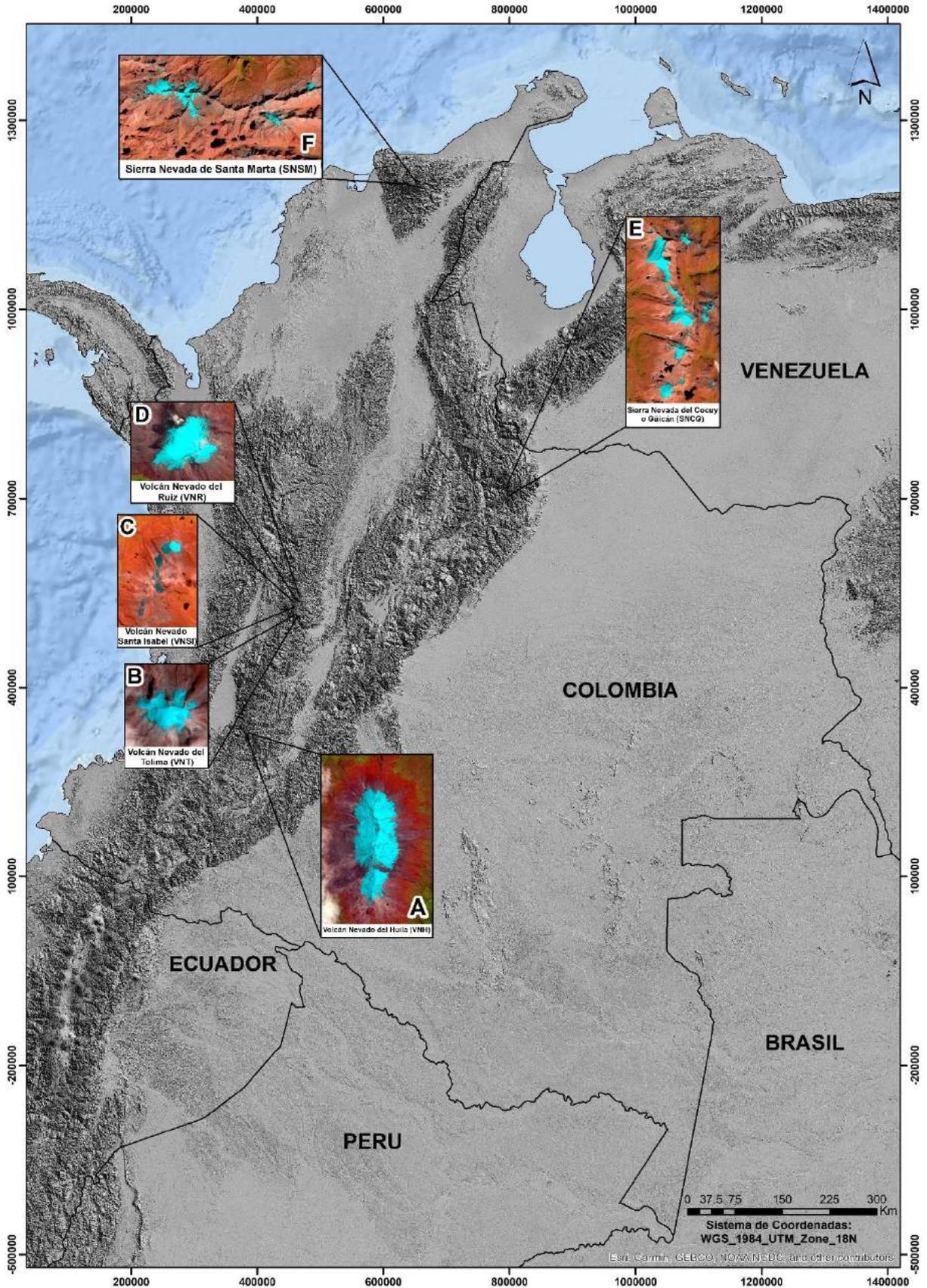
Según la secretaria de la Comunidad Andina, para el año 2007, el 95% de los glaciares tropicales pertenecían a Suramérica, donde el 71% están ubicados en Perú, el 22% en Bolivia, el 4% en Ecuador y el 3% en Colombia. Estos glaciares tropicales andinos, donde la característica principal para la formación de estos es la altura, generalmente por encima de los 5000 msnm, presentan cambios drásticos en sus superficies, por lo que los convierte en excelentes laboratorios para determinar el impacto del calentamiento global.

Actualmente Colombia cuenta con seis glaciares, donde cuatro se ubican en la cordillera central, uno se ubica en la cordillera oriental y uno al norte del país (Figura 4).

El área glaciaria para el año 2010 era de 45.3 km<sup>2</sup> (IDEAM, 2012) y para el año 2016 era de 39.13 km<sup>2</sup> (Tabla 1), dando como resultado un retroceso glaciario de 6.17 km<sup>2</sup> en seis años, lo que incrementa las labores de monitoreo por parte del IDEAM.

Glaciar	Área (km <sup>2</sup> ) año 2016
Volcán Nevado del Huila ( <b>VNH</b> )	7.47
Volcán Nevado del Tolima ( <b>VNT</b> )	0.62
Volcán Nevado Santa Isabel ( <b>VNSI</b> )	1.04
Volcán Nevado del Ruiz ( <b>VNR</b> )	9.03
Sierra Nevada del Cocuy o Güicán ( <b>SNCG</b> )	13.9
Sierra Nevada de Santa Marta ( <b>SNSM</b> )	7.1

Tabla 1: Área glaciaria Colombia año 2016. Datos proporcionados por el IDEAM.



**Figura 4:** Localización glaciares en el territorio colombiano. **A.** Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Huila (2017-04-04), **B.** Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Tolima (2017-02-03), **C.** Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado Santa Isabel (2017-06-03), **D.** Imagen Sentinel 2 Volcán Nevado del Ruiz (2017-06-03), **E.** Imagen Sentinel 2 Sierra Nevada del Cocuy o Güicán (2017-12-22) y **F.** Imagen Sentinel 2 Sierra Nevada de Santa Marta (2017-12-25). Imágenes obtenidas de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Cada una de estas superficies glaciares, se encuentran formadas sobre diferentes estructuras geológicas, recordando que cuatro de estos glaciares se encuentran sobre estructuras volcánicas activas clasificándolos como volcanes nevados, como lo son el VNH, VNT, VNSI y VNR. Los otros dos glaciares se clasifican como sierras nevadas, como lo son la SNCG el cual se encuentra sobre rocas sedimentarias plegadas con buzamiento hacia el occidente (Ceballos y Tobón, 2007), por otro lado, la SNSM se encuentra sobre un complejo ígneo-metamórfico de forma triangular limitado por fallas regionales (Colmenares et al., 2007).

#### 4.2.1. Glaciar Volcán Nevado del Huila (VNH)

El glaciar VNH, está ubicado al SW del territorio colombiano, su superficie glaciar se encuentra en una estructura volcánica de carácter activo. Según Alpala (2016) varios autores clasifican este volcán nevado como un estrato volcán con predominio de actividad efusiva sobre la explosiva, para el SGC (Servicio Geológico Colombiano) este complejo volcánico está compuesto por estratovolcanes y domos con un dominio claro de actividad efusiva. Según el IDEAM (2012) el centro del glaciar se localiza según coordenadas geográficas  $2^{\circ}55' N$ ,  $76^{\circ}03' W$  en jurisdicción de los departamentos de Cauca, Huila y Tolima (Figura 5), este posee una altura máxima de 5364 msnm, siendo la principal altura de los andes colombianos y se encuentra protegido por el Parque Natural Nacional Nevado del Huila. Las masas de hielo que reposan sobre esta estructura volcánica alargada se disponen N-S coincidiendo con el eje. La actividad volcánica de esta estructura a modelado por varias décadas esta masa de hielo, ocasionando cambios paulatinos en su área y espesor (IDEAM, 2012).

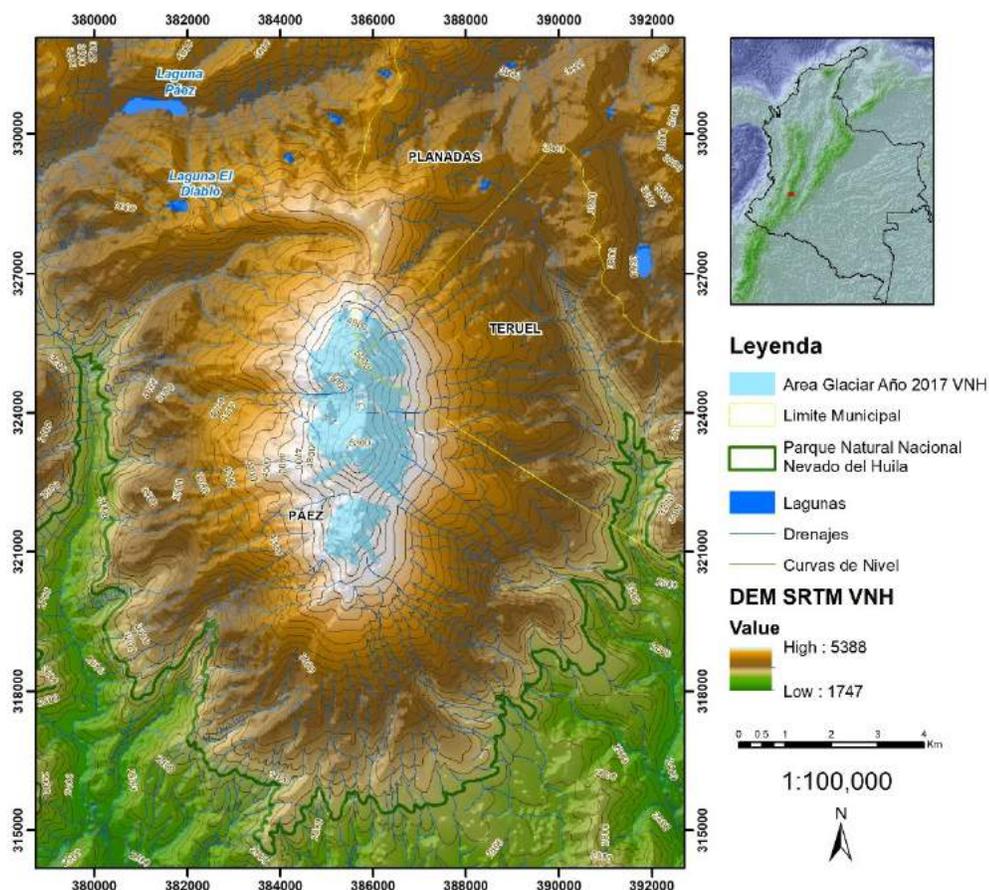


Figura 5: Localización VNH.

El primer registro que se tiene de área glaciar para el VNH data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciar de 37.80 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciar para los años 1959, 1996, 2009 y 2016 (Figura 6), en la Tabla 2 se detalla las áreas glaciares para cada respectivo año.

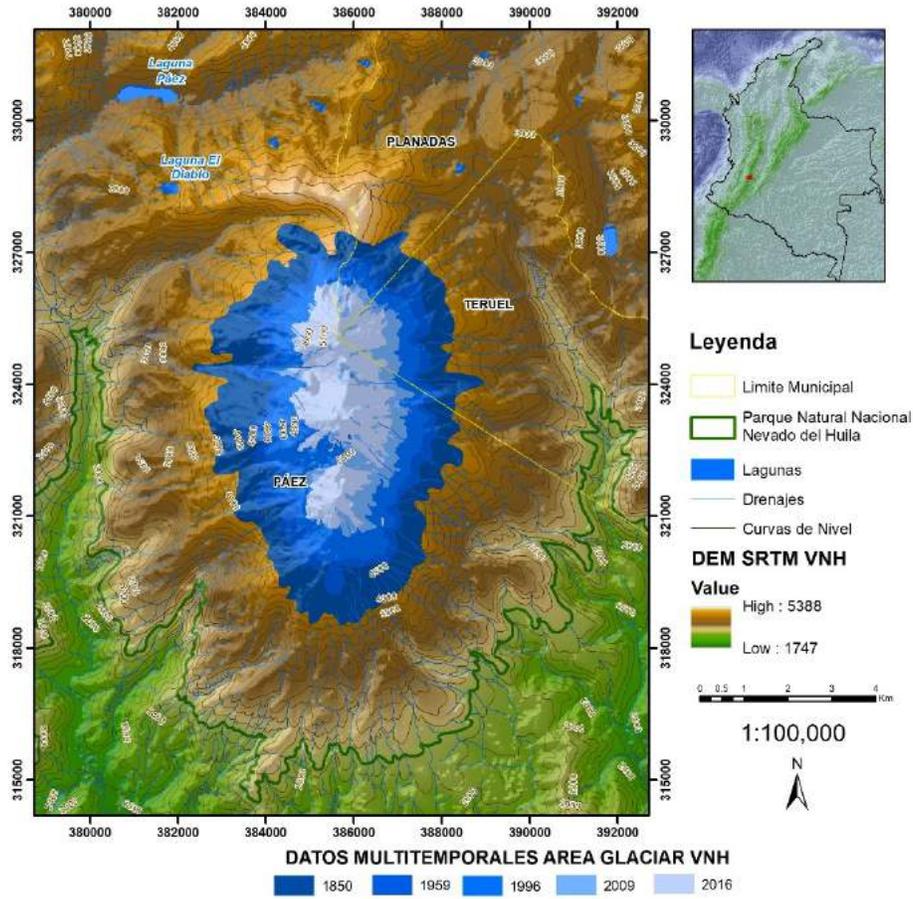


Figura 6: Datos multitemporales de área glaciar para el VNH. Información proporcionada por el IDEAM.

Datos Multitemporales Área Glaciar VNH	
Año	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )
1850	37.80
1959	23.25
1996	18.01
2009	10.04
2016	7.47

Tabla 2: Datos multitemporales de límite glaciar para el VNH. Información proporcionada por el IDEAM.

#### 4.2.2. Glaciar Volcán Nevado del Tolima (VNT)

El VNT, hace parte del complejo volcánico Ruiz-Tolima, es una de las tres montañas más altas del complejo. Según el IDEAM (2012), el centro del glaciar se localiza en coordenadas geográficas 4°39' N y 75°22' W en jurisdicción del departamento del Tolima (Figura 7), con una altura máxima de 5280 msnm, este se encuentra incluida en el área protegida del Parque Nacional Natural los Nevados El glaciar según el SGC se encuentra sobre un sustrato rocoso a partir de procesos volcánicos, estos a su vez se encuentran sobre un basamento de rocas cristalinas (Batolito el Bosque y Complejo Cajamarca).

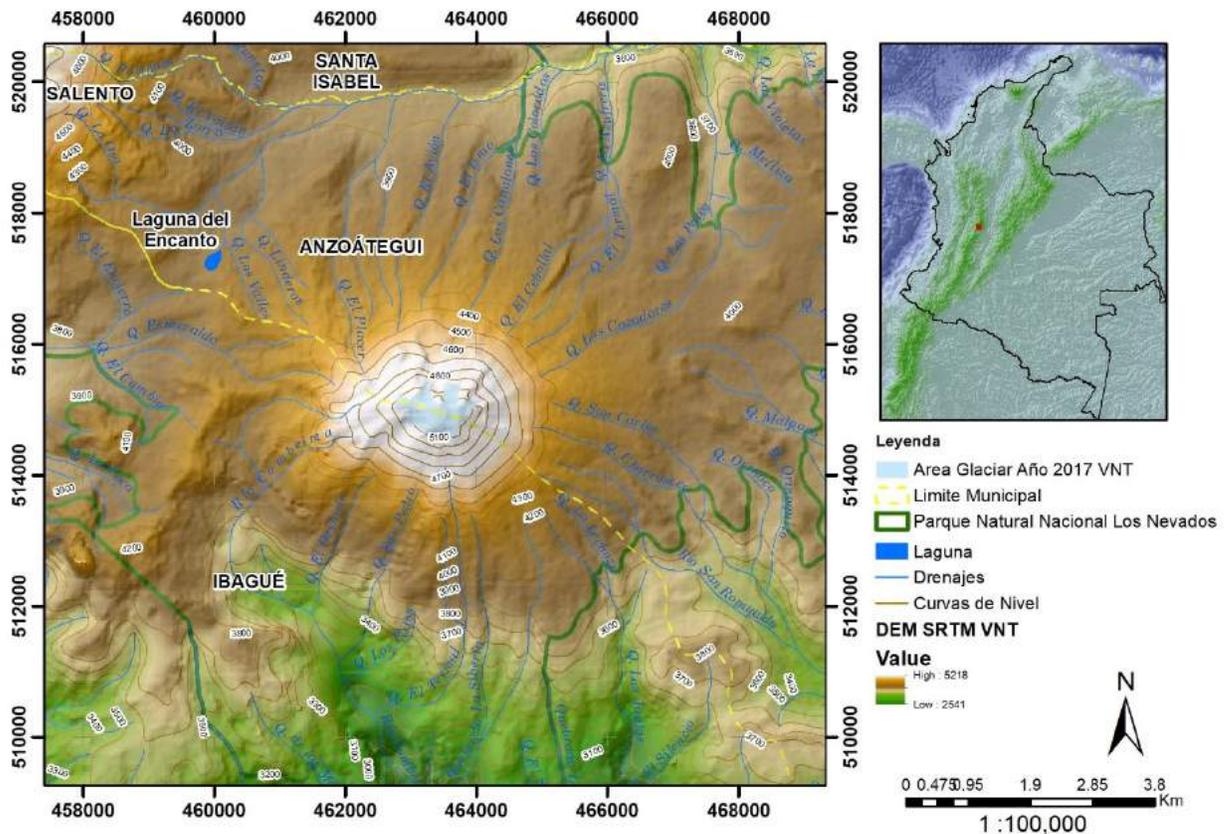


Figura 7: Localización VNT.

El primer registro que se tiene de área glaciar para el VNT data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciar de 8.58 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciar para los años 1955, 1996, 2010 y 2016 (Figura 8), en la Tabla 3 se detalla las áreas glaciares para cada respectivo año.

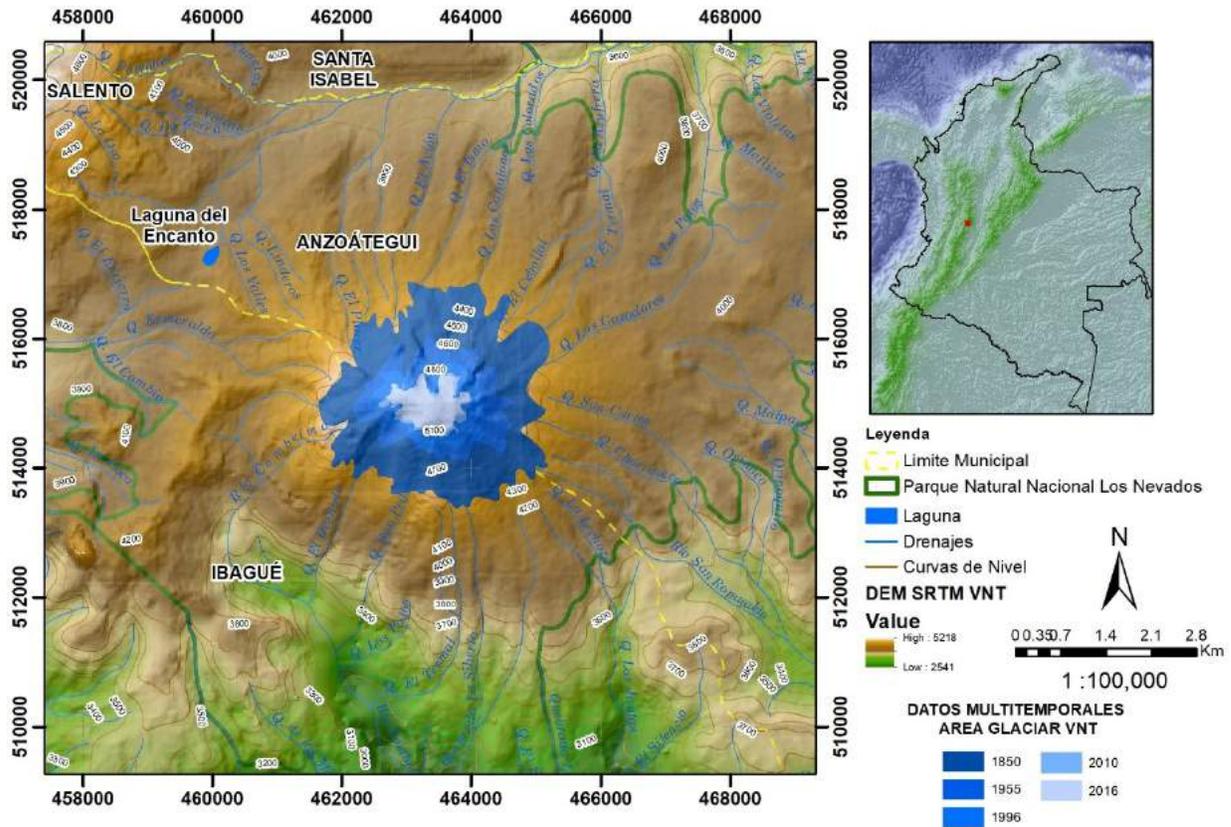


Figura 8: Datos multitemporales de área glaciár para el VNT. Información proporcionada por el IDEAM.

Datos Multitemporales Área Glaciár VNT	
Año	Área Glaciár (km <sup>2</sup> )
1850	8.58
1955	3.03
1996	1.7
2010	0.74
2016	0.62

Tabla 3: Datos multitemporales de límite glaciár para el VNT. Información proporcionada por el IDEAM.



Para el IDEAM, este glaciar presenta unas características muy especiales, una de ellas es ser el nevado de menor altitud de Colombia y el que presenta mayor desequilibrio en su dinámica glaciar lo que lo convierte en un excelente laboratorio para estudiar y analizar el cambio climático, por eso fue elegido por el IDEAM como sitio de investigación glaciológica y climática desde el año 2006 (IDEAM, 2012).

El primer registro que se tiene de área glaciar para el VNSI data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciar de 29.8 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciar para los años 1955, 1996, 2010 y 2016 (Figura 10), en la Tabla 4 se detalla las áreas glaciares para cada respectivo año.

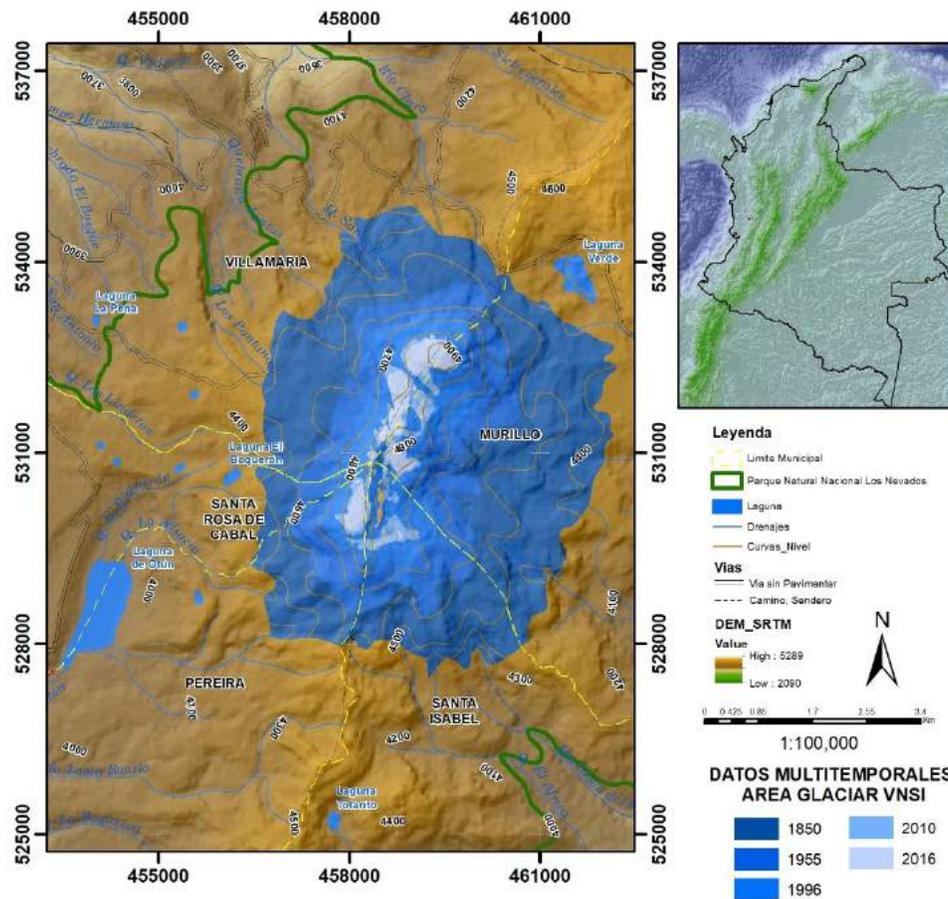


Figura 10: Datos multitemporales de área glaciar para el VNSI. información proporcionada por el IDEAM.

Datos Multitemporales Área Glaciar VNSI	
Año	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )
1850	29.80
1955	11.75
1996	5.53
2010	1.89
2016	1.04

Tabla 4: Datos multitemporales de limite glaciar para el VNSI. Información proporcionada por el IDEAM.

#### 4.2.4. Glaciar Volcán Nevado del Ruiz (VNR)

El VNR, hace parte al igual que el VNT y VNSI, del complejo volcánico Ruiz – Tolima. Según el IDEAM (2012) se localiza en las coordenadas geográficas 4° 53' N y 75° 19' W el cual es el punto central de volcán y se encuentra en jurisdicción de los departamentos de Caldas y Tolima, el VNR tiene una altura máxima de 5330 msnm y al igual que el VNT y VNSI se encuentra incluida en el área protegida del Parque Nacional Natural los Nevados (Figura 11). Según el SGC, la superficie glaciar se encuentra reposando sobre una estructura volcánica compuesta principalmente de lavas de composición andesítica con variaciones a dacita y depósitos de flujos y caída piroclástica, es clasificado como un estratovolcán con tendencias más efusivas que explosivas, actualmente es la estructura geológica con más actividad volcánica del territorio colombiano. Morfológicamente es una estructura en meseta, alargada en dirección NE-SW y algo achatado.

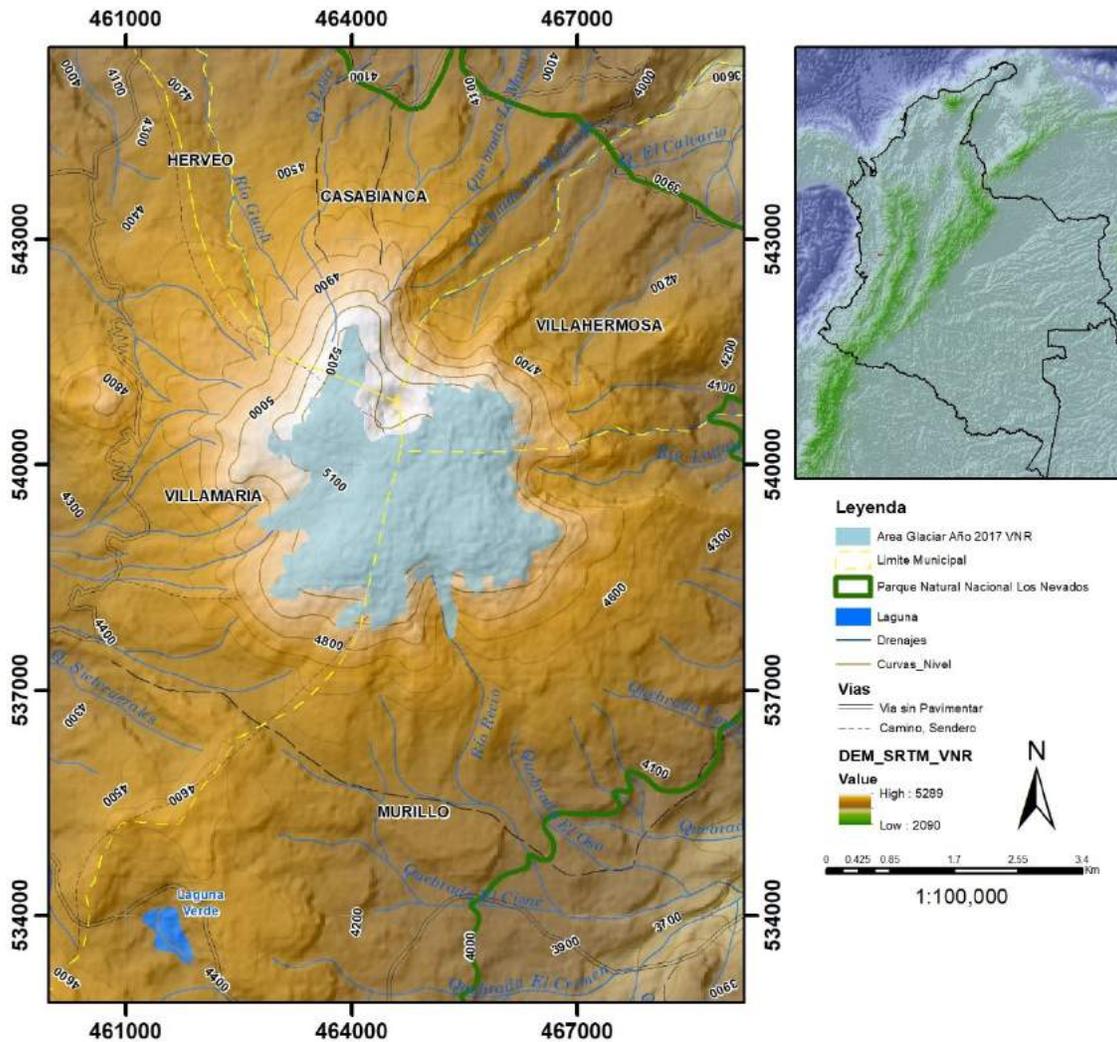


Figura 11: Localización VNR.

El primer registro que se tiene de área glaciar para el VNR data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciar de 50.22 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciar para los años 1955, 1996, 2010 y 2016 (Figura 12), en la Tabla 5 se detalla las áreas glaciares para cada respectivo año.

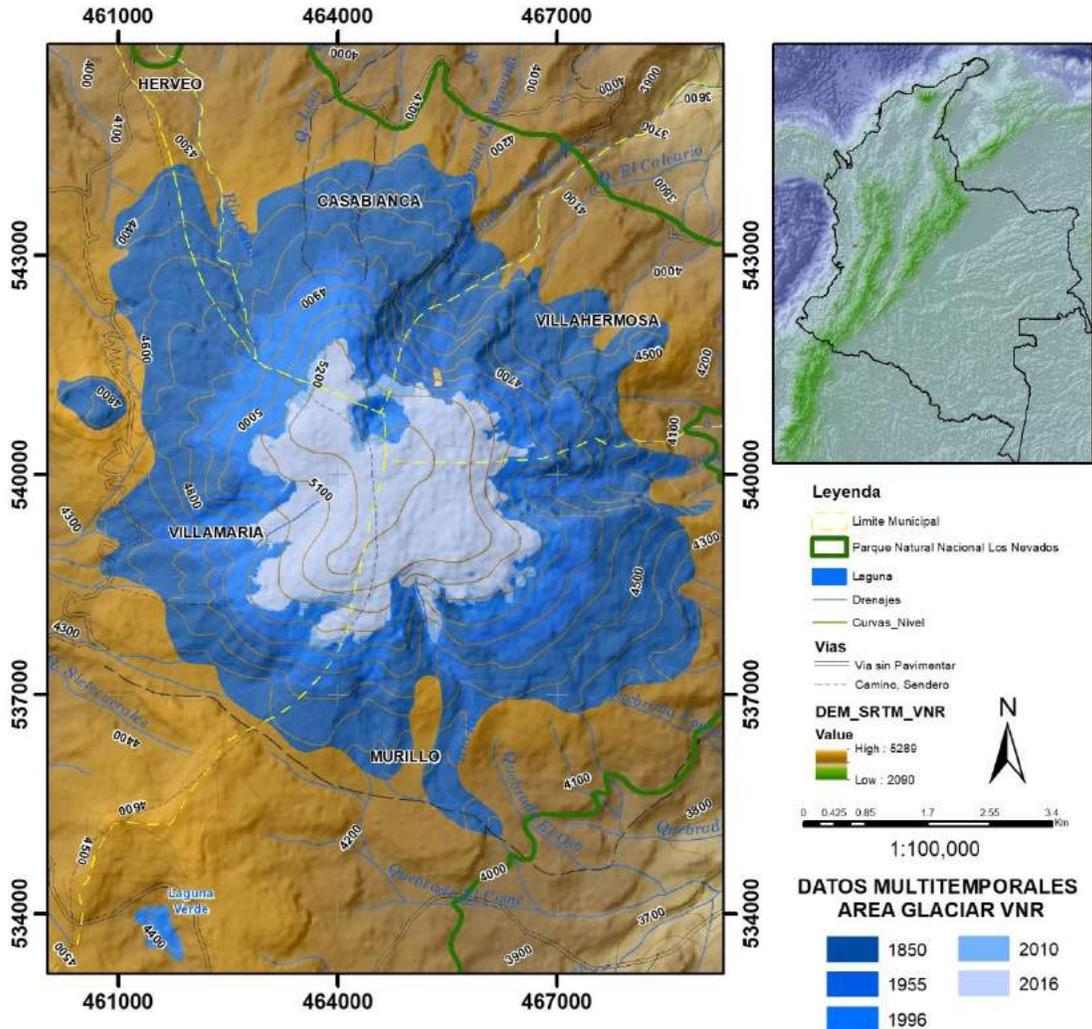


Figura 12: Datos multitemporales de límite glaciar para el VNR. Información proporcionada por el IDEAM.

Datos Multitemporales Área Glaciar VNR	
Año	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )
1850	50.22
1955	21.86
1996	16.52
2010	9.79
2016	9.03

Tabla 5: Datos multitemporales de área glaciar para el VNR. Información proporcionada por el IDEAM.

#### 4.2.5. Glaciar Sierra Nevada del Cocuy o Güicán (SNCG)

La SNCG, el glaciar más extenso del territorio colombiano, se ubica según el IDEAM (2012) entre las coordenadas geográficas 6°21' a 6°33' N y entre los 72°15' a 72°19' W, en los departamentos de Boyacá y Arauca, con la particularidad de ser la única zona glaciada de la cordillera oriental de los andes colombianos, con una altura máxima de 5380 msnm (Figura 13). Este glaciar se encuentra incluido en el área protegida por el Parque Nacional Natural el Cocuy y parte de este se encuentra dentro del área de resguardo indígena unido Uwa. La geología sobre la cual se encuentra el glaciar, se basa en rocas sedimentarias de ambiente oceánico de edad cretácico, donde la tectónica regional de la zona forman sistemas de anticlinales y sinclinales (INGEOMINAS, 1981), producto de la erosión, hacia el flanco este del glaciar se encuentra una zona escarpada donde afloran los estratos de toda la secuencia sedimentaria y hacia el flanco oeste del glaciar esta superficie presenta una inclinación que concuerda con el buzamiento de las rocas dando la apariencia de “sierra”.

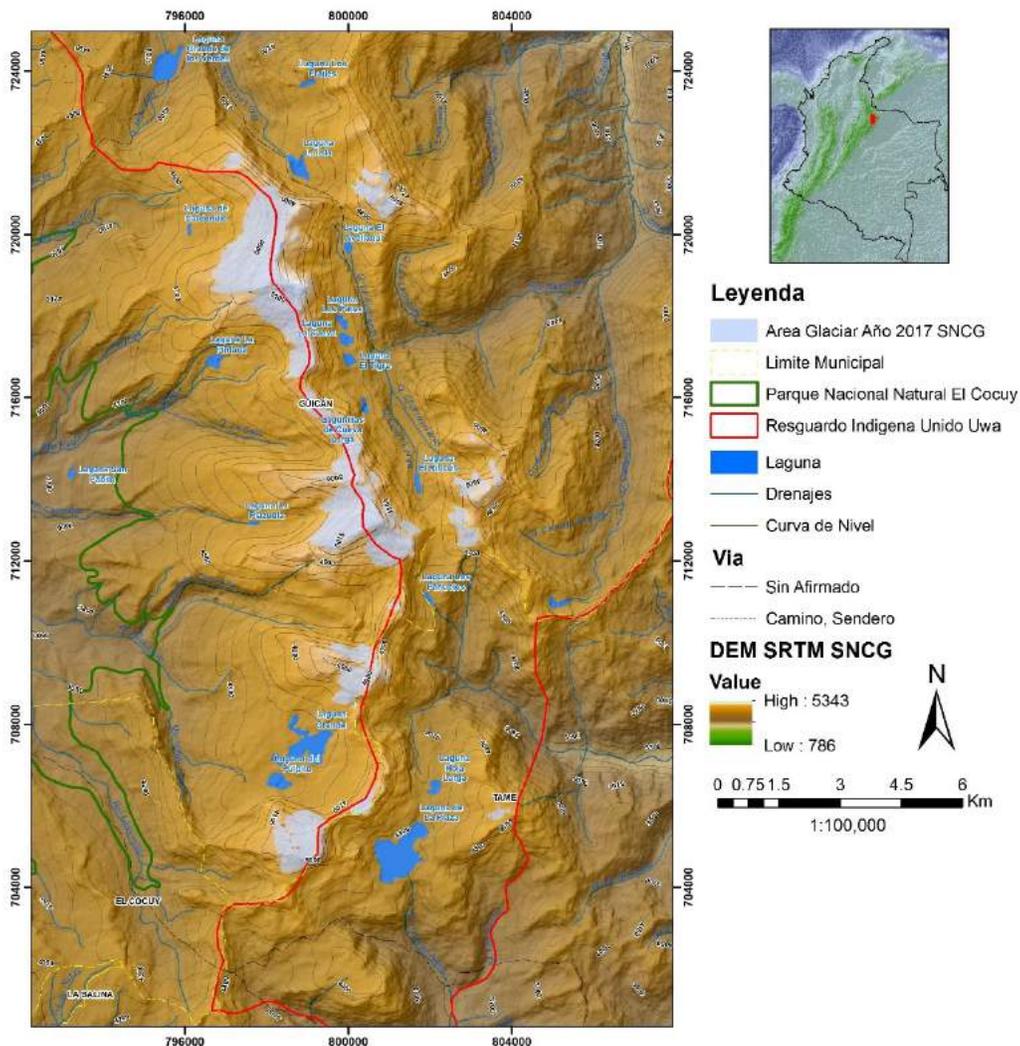
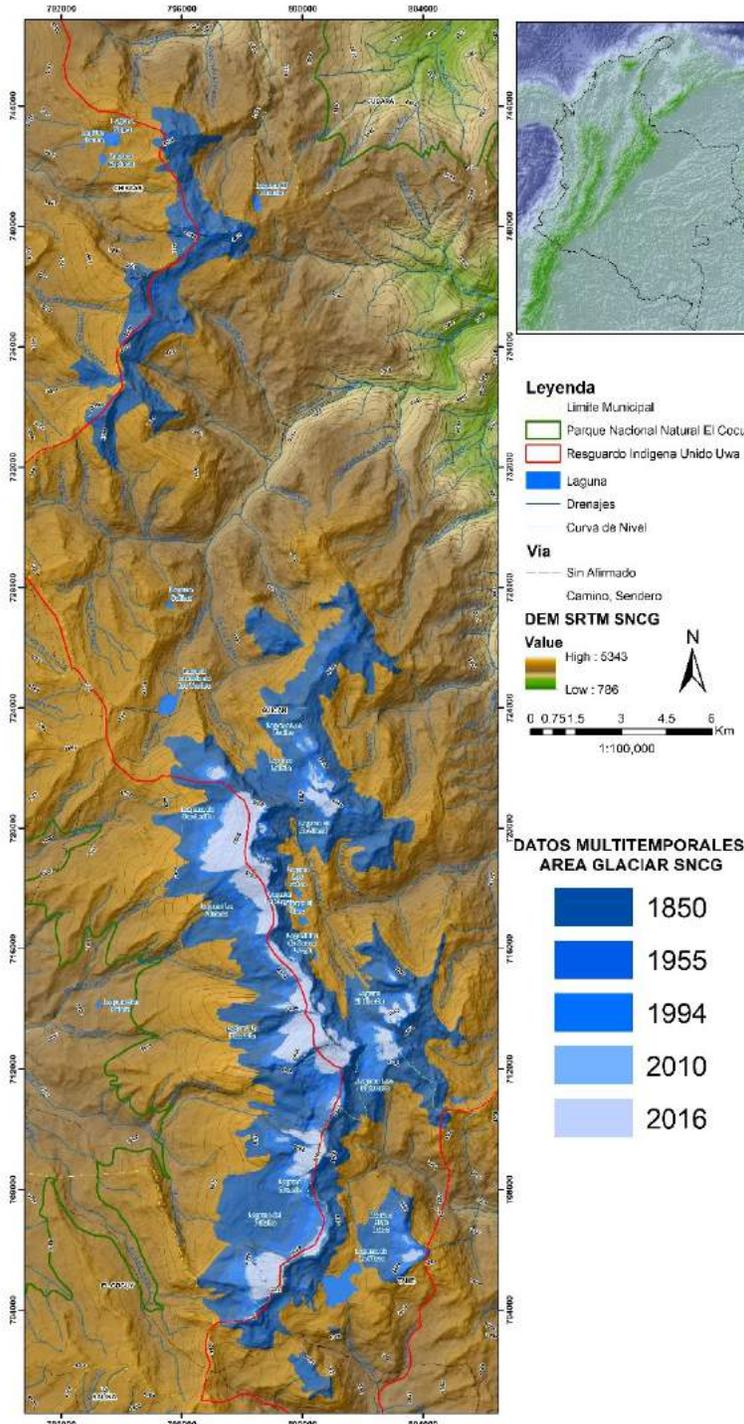


Figura 13: Localización SNCG.

El primer registro que se tiene de área glaciara para la SNCG data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciara de 126.62 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciara para los años 1955, 1994, 2010 y 2016 (Figura 14), en la Tabla 6 se detalla las áreas glaciaras para cada respectivo año.



Datos Multitemporales Área Glaciara SNCG	
Año	Área Glaciara (km <sup>2</sup> )
1850	126.68
1955	39.76
1994	25.71
2010	16.04
2016	13.89

Tabla 6: Datos multitemporales de área glaciara para el SNCG. Información proporcionada por el IDEAM.

Figura 14: Datos multitemporales de Limite glaciara para el SNCG. Información proporcionada por el IDEAM.

#### 4.2.6. Glaciar Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM)

El glaciar de la SNSM, se encuentra sobre el macizo litoral más alto del mundo, según el IDEAM (2012), se ubica entre las coordenadas geográficas 10°47' - 10°52' N y 73°34' - 73°44', en los departamentos del Magdalena, Cesar y Guajira, con una altura máxima de 5775 msnm (Figura 15). Este glaciar se encuentra incluido en el área protegida del Parque Natural Nacional Sierra Nevada de Santa Marta y también hace parte del área protegida por el resguardo indígena Kogui – malayo Arhuaco. La geología de la zona sobre la cual se encuentra el glaciar es muy variada, desde rocas sedimentarias y volcano-sedimnetarias hasta rocas intrusivas y metamórficas, modelan abruptamente la zona con pendientes muy escarpadas lo que ayuda a la acumulación y formación de hielo en esta región.

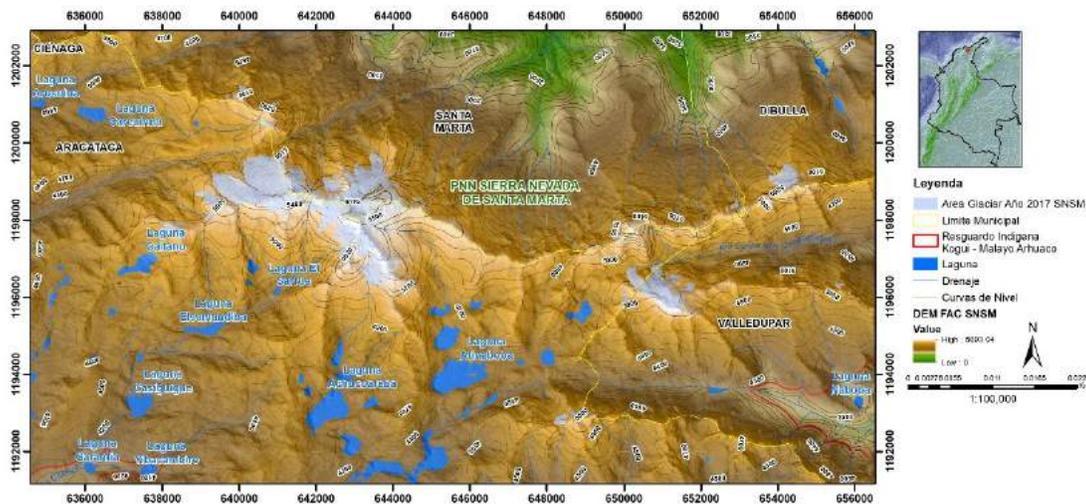


Figura 15: Localización SNSM.

El primer registro que se tiene de área glaciar para la SNSM data del siglo XIX más precisamente del año 1850 donde determinan un área glaciar de 85.33 km<sup>2</sup>, a partir de esta fecha se tienen cuatro registros de área glaciar para los años 1954, 1995, 2010 y 2016 (Figura 16), en la Tabla 7 se detalla las áreas glaciares para cada respectivo año.



Figura 16: Datos multitemporales de Límite glaciar para el SNSM. Información proporcionada por el IDEAM.

<b>Datos Multitemporales Área Glaciar SNSM</b>	
<b>Año</b>	<b>Área Glaciar (km<sup>2</sup>)</b>
1850	85.31
1954	21.28
1995	12.56
2010	7.48
2016	7.1

**Tabla 7:** Datos multitemporales de área glaciar para el SNSM. Información proporcionada por el IDEAM.

### 4.3. Mapeo Glaciar

#### 4.3.1. Satélite Óptico Sentinel 2

La misión Sentinel 2 hace parte de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), la cual consta de una constelación de dos satélites idénticos (S2A y S2B) colocados en la misma órbita que trabajan simultáneamente, separados 180° uno del otro, la órbita de estos dos satélites es sincrónica. La altitud de la órbita de ambos satélites es de aproximadamente 786 km con una inclinación orbital de 98.62° (ESA, 2015). Posee 12 bandas espectrales que se asocian principalmente a tres resoluciones espaciales 10 m, 20 m y 60 m (Figura 17).

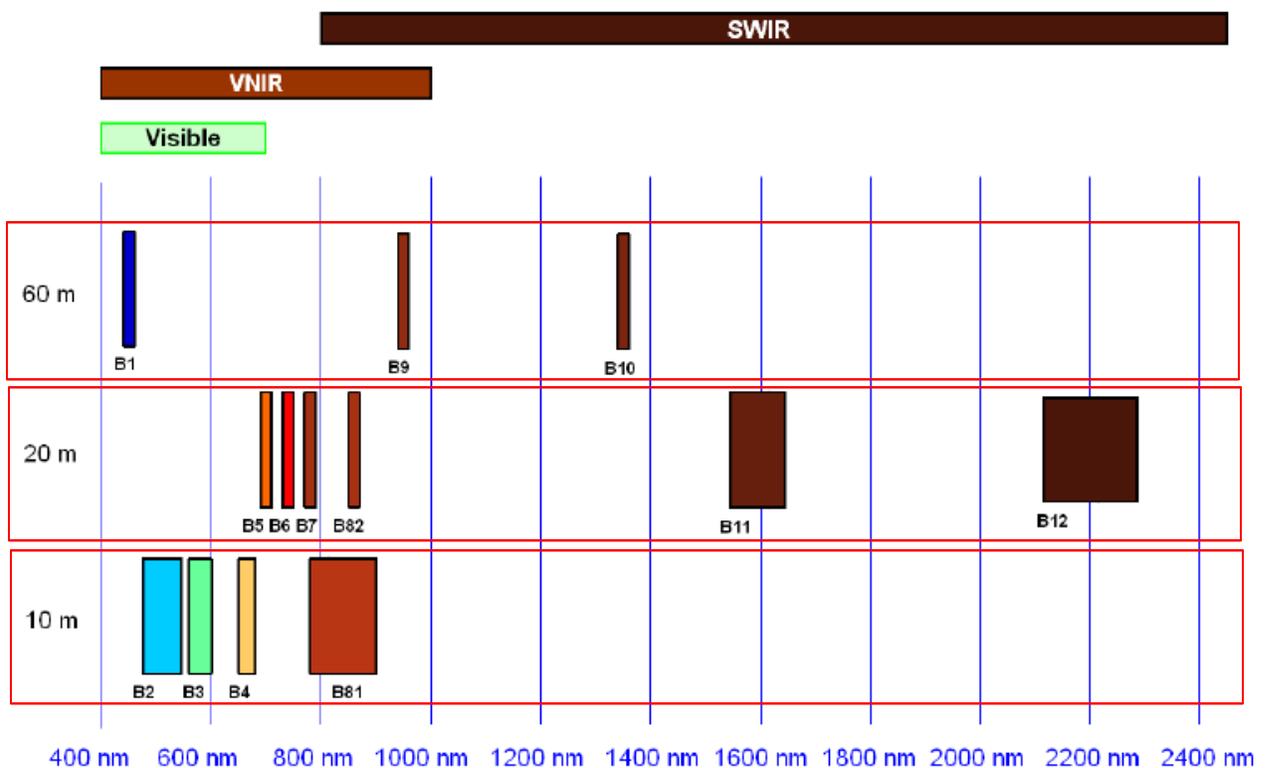


Figura 17: Bandas espectrales y resolución espacial asociada, para la misión Sentinel 2 (Müller et al. 2016).

En la Tabla 8 se detallarán las características de resolución tanto espacial, radiométrica, temporal y espectral:

Resolución Espectral (# de bandas)	Resolución Espacial (m)	Instrumento MSI				Resolución Radiométrica	Resolución Temporal	Ancho de Franja
		S2A		S2B				
		Longitud de Onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)	Longitud de Onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)			
2	10	496.6	98	492.1	98	12 bits	10 días para cada satélite, pero combinada es de 5 días	290 km
3		560	45	559	46			
4		664.5	38	665	39			
8		835.1	145	833	133			
5	20	703.9	19	703.8	20			
6		740.2	18	739.1	18			
7		782.5	28	779.7	28			
8a		864.8	33	864	32			
11		1613.7	143	1610.4	141			
12		2202.4	242	2185.7	238			
1	60	443.9	27	442.3	45			
9		945	26	943.2	27			
10		1373.5	75	1376.9	76			

**Tabla 8:** Características de resolución espacial, radiométrica, temporal y espectral de la misión Sentinel 2 (ESA, 2015).

Según ESA (2015) existen cinco tipos de productos para Sentinel 2, los cuales se denominan Nivel 0, Nivel 1A, Nivel 1B, Nivel 1C y Nivel 2A (Figura 18).

- El Nivel 0 corresponde a los datos en bruto adquiridos por los satélites, estos datos no están disponibles al público. Son adquiridos en formato de imagen raw y comprimidos en formato ISP (Instrument Source Packet), los gránulos tienen dimensiones de 25 km de ancho por 23 km de largo.
- El Nivel 1A se obtiene al descomprimir los datos en bruto del Nivel 0, estos datos al igual que el nivel anterior no están disponibles al público. Los gránulos tienen dimensiones de 25 km de ancho por 23 km de largo.
- El Nivel 1B usa el producto de Nivel 1A y aplica las correcciones radiométricas requeridas en valores de radiancia por encima de la atmosfera (TOA por sus siglas en ingles), para este producto se requiere de un conocimiento avanzado en técnicas de orto rectificación. Las coordenadas en este nivel se refieren al centro de cada pixel. El producto final es una imagen comprimida usando el algoritmo JPEG2000.

- El Nivel 1C está compuesto por 100 km<sup>2</sup> de gránulos que se componen de ortoimágenes en proyección UTM/WGS84. Los productos del Nivel 1C resultan del uso de un DEM para proyectar la imagen en coordenadas cartográficas. Las mediciones radiométricas por píxel se proporcionan en reflectancias en la parte superior de la atmosfera (TOA por sus siglas en inglés) con todos los parámetros para transformarlas en radiancias. Los productos de nivel 1C se remuestran con una distancia de muestreo de tierra constante (GSD) de 10, 20 y 60 m, dependiendo de la resolución nativa de las diferentes bandas espectrales. En productos de nivel 1C, las coordenadas de píxel se refieren a la esquina superior izquierda del píxel, todas las correcciones realizadas en este nivel se desarrollan a nivel subpíxel. El producto final son imágenes con un ancho de franja de 100 x 100 km y con un peso total de 500 MB por paquete.
- El Nivel 2A al igual que el Nivel 1C está compuesto por 100 km<sup>2</sup> de gránulos, este nivel se genera a partir del Nivel 1C, aquí el usuario entra a jugar un papel muy importante ya que este es el encargado de generar esta corrección por medio del software SNAP con la herramienta *Sentinel-2 Toolbox* y el procesador Sen2Cor (ESA, 2015; Egbers, 2016), en este procesamiento se genera una clasificación de escenas y correcciones atmosféricas corrigiendo las reflectancias en la parte inferior de la atmosfera (BOA por sus siglas en inglés).

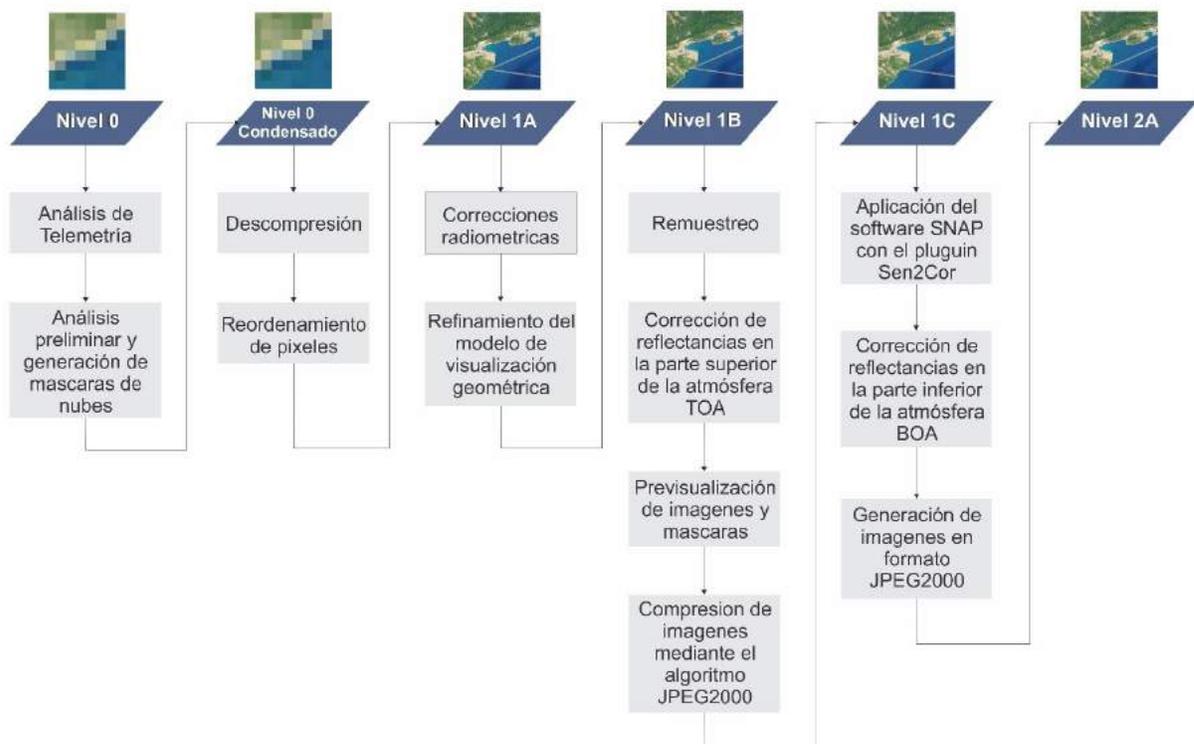


Figura 18: Niveles de procesamiento productos Sentinel 2 (Modificado de ESA, 2015).

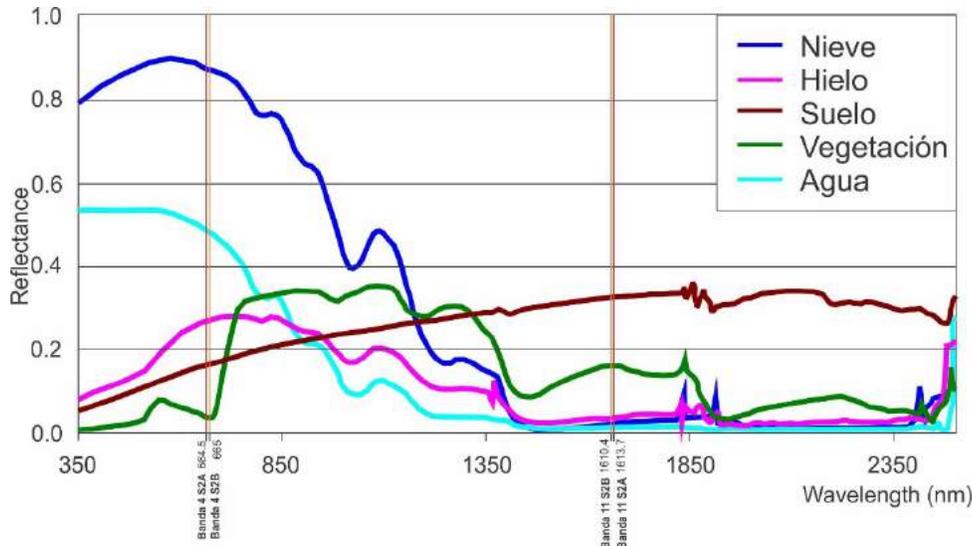
### 4.3.2. Calculo de Área Glaciar

Para el cálculo del área de todas las superficies glaciares colombianas, se utilizaron tecnologías, insumos y metodologías que en conjunto permiten el monitoreo de estos glaciares de forma precisa y sencilla, arrojando resultados certeros que ayudan a visualizar y entender la problemática presente en nuestros glaciares colombianos.

Para esto instituciones como el IDEAM se apoya de todas estas herramientas para realizar un seguimiento minucioso del cambio latente en estas superficies, con el fin de informar a la comunidad sobre el problema que acarrea los malos manejos de todos los recursos a nuestra disposición.

Herramientas como los SIG, son de gran ayuda para el manejo correcto de la información, información que está disponible al público gratuitamente como imágenes satelitales de media a alta resolución, que de hecho son el insumo más importante ya que a partir de estas imágenes o escenas se puede tener una perspectiva mucho mejor de la superficie terrestre, a partir de esta información se puede generar datos relevantes sobre las características tanto espaciales como temporales de cualquier superficie en el planeta.

Para determinar o calcular el área glaciar, existen una serie de metodologías las cuales van muy de la mano de las herramientas e insumos a disposición, dependiendo de esto se puede elegir la metodología adecuada, para el caso del trabajo se empleo una metodología de relación de bandas o band ratio (Hall, 1987; Jacobs, 1997; Egbers, 2016; Paul, 2016; Rastner et al., 2014) utilizada ampliamente en muchos trabajos a nivel mundial, esta metodología consiste en obtener el cociente de dos bandas de diferente espectro, para el caso de la delimitación de glaciares, se utiliza generalmente una banda donde se observe que las superficies glaciares posean una alta reflectancia y una banda donde las superficies glaciares posean una baja reflectancia, donde es claro que las superficies glaciares tienen una baja reflectancia en el espectro del infrarrojo de onda corta (SWIR) y tiene una alta reflectancia en el espectro del visible (VIS) (Kulkarni, 2007), ejemplo de esto, para el trabajo se utilizaron imágenes Sentinel 2, donde las bandas escogidas según la características de reflectancia anteriormente dichas son las bandas 4 (rojo – VIS) y la banda 11 (infrarrojo de onda corta – SWIR) (Figura 19), aunque se pueden utilizar varias combinaciones para determinar el cociente, esta era la que mejor resultados se obtenía de área glaciar ya que discriminaba muy bien estas superficies de las demás (roca, vegetación, agua, etc.), a partir de un SIG se procede a calcular este cociente y posteriormente se procede a realizar el postproceso para determinar el área glaciar, esto se detallara en el capítulo metodología.



**Figura 19:** Curvas de reflectancia para diferentes coberturas, en donde se observa los cambios de reflectancia para las bandas espectrales b4 (VIS) y b11 (SWIR) de Sentinel 2 (Tomado y Modificado de Kulkarni, 2007).

#### 4.4. Parámetros Topográficos

Según Paul et al. (2009), a partir de técnicas geo-informáticas modernas, se pueden copilar ciertas características de las superficies glaciares que permiten determinar el comportamiento de estos cuerpos, estas características hacen alusión a parámetros topográficos que a partir de un DEM se pueden determinar fácilmente para copilarlos en inventarios glaciares, como por ejemplo los inventarios glaciares generados por la institución GLIMS (Global Land Ice Monitoring from Space) y WGMS (World Glacier Monitoring Service) a nivel mundial (Paul et al. 2009).

En la Tabla 9 se especifica los parámetros topográficos para zonas glaciares según WGMS y GLIMS:

Nombre	Ítem	Símbolo
Código	ID	ID
Coordenadas	x_coord, y_coord	x, y
Data de Adquisición	Fecha	Fecha
Área de Superficie	Area_km2	S
Longitud Max	Longitud	$l_{max}$
Elevación Mínima	Min	$h_{min}$
Elevación Máxima	Max	$h_{max}$
Elevación (Media)	Media	$H_{mean}$
Elevación (Mediana)	Mediana	$h_{medi}$
Pendientes (Media)	Slope_deg	A
Aspecto (Media)	Aspecto_360	$\emptyset_{360}$
Sector de Aspecto	Aspecto_sec	$\emptyset_{sec}$

**Tabla 9:** Parámetros topográficos para zonas glaciares según el inventario glaciar propuesto por WGMS y GLIMS (Paul et al. 2009).

Los anteriores parámetros se pretenden calcular para cada uno de los glaciares colombianos, por medio de un software SIG e insumos como la delimitación glaciar obtenida de las imágenes Sentinel 2 y DEM's como SRTM y ASTER GDEM, se procede a utilizar metodologías para el cálculo de cuencas glaciares y posteriormente los parámetros topográficos para cada cuenca, lo anterior se detallará más a fondo en el capítulo metodología.

#### 4.5. Antecedentes

El impacto del calentamiento global, producto de los gases invernadero atrapados en la atmosfera, han provocado grandes cambios en la superficie terrestre, especialmente en cuerpos muy sensibles a estos como lo son los glaciares.

El territorio colombiano no ha estado exento de estos impactos, este presenta sobre su cordillera central una serie de estructuras volcánicas, las cuales presentan en su parte más superficial masas de hielo denominados glaciares, estos se definen como una masa de hielo en movimiento que incluye detritos rocosos y se caracteriza por el balance entre la acumulación y la ablación (IDEAM, 2012).

Según Pabón, 2003, el deterioro de los glaciares colombianos ha venido en auge, donde, entre los años 1940 y 1985 han desaparecido cerca de ocho glaciares por lo que actualmente solo existen cuatro volcanes nevados (Monterroso, 2016) Nevado del Ruiz (VNR), Nevado del Tolima (VNT), Nevado Santa Isabel (VNSI) y Nevado del Huila (VNH) y dos sierras nevadas (Cocuy y Santa Marta).

El IDEAM (2012), cita que alrededor del mundo, el área glaciar es aproximadamente 684.294 km<sup>2</sup>, en Suramérica es aproximadamente 25.500 Km<sup>2</sup> (3.7% a nivel mundial); los glaciares en Colombia representan no más que el 0.17% de los glaciares andinos y actualmente sigue en descenso, por lo que varios estudios han surgido alrededor de este tema y se ha determinado el deterioro de estas superficies por medio de las tecnologías espaciales y técnicas que han cuantificado el retroceso glaciar.

Diferentes estudios de retroceso glaciar se han realizado alrededor del mundo, donde aplican técnicas para diferenciar cuerpos de nieve presentes en la superficie terrestre, una de las técnicas denominada band ratio (relación de bandas) es muy utilizada por la exactitud a la hora de diferenciar las superficies glaciares de los demás elementos terrestre, para lo cual se empleará en el presente trabajo.

Hall (1987), hace un estudio para la caracterización de cuerpos de hielo y nieve para tres glaciares ubicados en Austria y Alaska, por medio de datos obtenidos del satélite Landsat TM (Thematic Mapper), estudia la reflectancia que emiten estos cuerpos glaciares por medio de la relación de las bandas TM4 (0.76 – 0.90 μm)

donde la reflectancia sobre el hielo y la nieve es alta y TM5 (1,55-1,75  $\mu\text{m}$ ) donde la reflectancia es baja para el hielo y la nieve, proponiendo que esta relación proporciona información muy útil del cuerpo glaciar delimitando arealmente así las zonas de acumulación y ablación por medio de la reflectancia que emite cada uno, asociado a esto, también es una herramienta muy útil a la hora de eliminar las variaciones de intensidad causadas por las sombras. También identifica por medio de la banda TM6 (10,4-12,5  $\mu\text{m}$ ) las temperaturas radiométricas de los glaciares tanto en las zonas de ablación y de acumulación, determinando una disminución en las temperaturas para cada zona.

Williams et al. (1991), aplica técnicas en imágenes satelitales Landsat MSS (Multispectral Scanner) y TM (Thematic Mapper) para analizar las diferentes facies de un glaciar denominado Bruarjókull (Islandia). Aplica la técnica de la relación de las bandas espectrales TM4/TM5, determinando así las diferentes variaciones faciales que puede tener un glaciar, explicando la gran utilidad de esta técnica para delimitar y cartografiar cuerpos superficiales.

Rott (1994), realiza una investigación con datos PolSAR e imágenes satelitales de alta resolución, Landsat TM, en terrenos Alpinos (Austria), con el fin de desarrollar técnicas para la cartografía de superficies relacionadas a coberturas ya sean de hielo, nieve, vegetación, roca, etc. El autor utiliza modelos matemáticos para compensar las variaciones de la iluminación superficial relacionadas a la topografía. Por medio de estas dos herramientas (PolSAR y Landsat) logra determinar una buena cartografía de precisión de superficies donde el cambio temporal es muy variado, ejemplo de esto es el cambio lento de límites glaciares y de áreas de vegetación, permitiendo así calcular arealmente los cambios o pérdida de estas superficies. Así mismo, indica que al momento de trabajar con imágenes Landsat es recomendable utilizar el método de relación de las bandas TM3/TM5, teniendo en cuenta la complejidad del terreno a estudiar, ya que esta relación es de gran ayuda a la hora de separar superficies libres de hielo y nieve y de nieve y hielo glaciar, ya que estas dos últimas presentan un comportamiento espectral muy similar, relacionado a esto también es de importancia utilizar métodos manuales de cartografía para identificar con precisión los límites de los glaciares.

Jacobs et al. (1997), determina el retroceso de la capa de hielo de Barnes, en la isla Baffin (Canadá) para los años 1961 a 1993, por medio de una cartografía digital a partir de imágenes Landsat TM, donde realiza correcciones geométricas, atmosféricas y calibraciones radiométricas a las imágenes para identificar las facies del glaciar, superficies de agua, cuerpos rocosos y depósitos superficiales. Para la investigación, utilizan las bandas espectrales TM4 y TM5, donde, al utilizar la relación de estas dos bandas (TM4/TM5) diferencia con claridad las superficies de hielo, agua, superficies glaciadas, cuerpos rocosos y materiales inconsolidados, determinando así el retroceso glaciar entre los años 1961 a 1993 de aproximadamente 43  $\text{km}^2$ .

Fuentes (2008), describe las ventajas que tienen los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del satélite Landsat 7 para el

estudio de glaciares, donde recalca la importancia de este tipo de herramientas para el estudio de estos cuerpos que no son ajenos al cambio climático. Para explicar estas ventajas utiliza técnicas especiales para el estudio de estas superficies como lo es el NDSI (Índice Normalizado de Nieves) y la relación TM3/TM5 o TM4/TM5, haciendo énfasis en las características de las bandas utilizadas para cada método, con el fin de determinar que métodos son más apropiados para ciertos tipos de zona glaciar dependiendo de las características físicas que presenta, también factores importantes como la reflectividad que presenta estos cuerpos y zonas de sombra que se puedan identificar.

Gonzáles et al. (2009), hace una comparación de técnicas de mapeo de cobertura glaciar por medio de imágenes Landsat y Aster en la cordillera Blanca (Ancash, Perú). Las técnicas utilizadas para Landsat y Aster son NDSI (Normalized Difference Snow Index) y relación de bandas (Ratio), para Landsat el NDSI utilizo las bandas 2 y 5 y para el ratio utilizo las bandas 3 y 5, mientras tanto para Aster el NDSI utilizo las bandas 1 y 4 y el ratio utilizo bandas 2 y 4. Llegando a la conclusión de que ambos métodos son de gran utilidad a la hora de identificar superficies glaciares, pero presentando diferencias, en cuanto a el mapeo de zonas como lagunas y sombras, donde el ratio tiene mejor claridad para mapear estas zonas y diferenciarlas de las zonas glaciares, mientras que el NDSI toma como superficie glaciar lagos y sombras presentando así errores de interpretación.

Pellikka & Rees (2010), recopilan en su libro *Remote Sensing of Glaciers*, una serie de tecnicas para el mapeo glaciar por medio de la teledeteccion, donde explican por medio de imágenes Landsat TM y ETM+, la manera de identificar las superficies glaciares por medio de metodos de relacion de imágenes (Ratio images) como TM3/TM5 y TM4/TM5, explicando la importancia de este metodo para este tipo de estudios, aclarando asi que la diferencia entre los dos metodos es muy pequeña. Tambien determinan la importancia de la banda TM6 como una alternativa para la banda TM5, para casos donde las superficies glaciares presentan capas de ceniza y poder discrimiar estas zonas de las facies glaciares.

Medina y Mejía (2010), proponen un estudio del comportamiento de glaciares tropicales del Perú relacionados a eventos de El Niño y La Niña, este análisis lo realizan entre los años de 1950 y 2009, utilizando técnicas como NDSI y relación de bandas 3/5 (band ratio 3/5) determinando así el retroceso glaciar para los nevados Haundoy y Pastoruri. Los autores concluyen que el método que mejor expresa los resultados de los glaciares es el de relación de bandas 3/5 ya que discrimina muy bien la nieve o hielo en regiones de sombras, tierra o roca.

La WMO (2012), presenta un documento donde hacen una revisión sobre teledetección de cubierta de nieve y sobre metodologías, explicando que satélites son los más apropiados para detectar este tipo de coberturas y que datos son los más aptos para diferenciar la nieve de otras coberturas.

Copé (2014), realiza un estudio de retroceso glaciar al sur del continente suramericano en la isla Livingston (Antártida), donde realiza una actualización de

la cartografía de dicha isla utilizando imágenes satelitales del Landsat 5, 7 y 8 de los años 1988, 2005 y 2014 respectivamente, utilizando diferentes técnicas como *Clasificación Supervisada*, *NDSI (Normalized Difference Snow Index)*, *Digitalización Manual*, *Ratio 3/5*, *Ratio 4/5*, calculando así pérdida glaciaria de 52 km<sup>2</sup>, 86 km<sup>2</sup>, 49 km<sup>2</sup>, 67 km<sup>2</sup> y 59 km<sup>2</sup> respectivamente. Por medio de cada una de las anteriores técnicas determina el retroceso glaciario y compara los datos, definiendo así, las técnicas más apropiadas para mapear superficies glaciares, teniendo en cuenta el factor sombra que en muchos casos causa problemas a la hora de diferenciarlo de superficies de hielo, dando importancia a los métodos de relación de imágenes de las bandas 3/5 y 4/5.

Peña (2015), realiza un análisis multitemporal del retroceso glaciario en la Sierra Nevada del Cocuy para los años 1992, 2003 y 2014, utilizando imágenes satelitales Landsat TM y ETM+, en las cuales le hace sus debidas correcciones para la mejora de las imágenes y posteriormente utilizar el método de Clasificación Supervisada aplicando el algoritmo Maximun Likelihood Preview. Con la metodología utilizada para este estudio concluye que el retroceso glaciario es de 16.9 km<sup>2</sup> donde entre los años 1992 – 2003 el área de pérdida fue de 7.7 km<sup>2</sup> y entre los años 2003 – 2014 el área de pérdida fue de 9.2 km<sup>2</sup>.

Gómez (2016), en su trabajo de grado, determina los cambios del glaciario en el Volcán Nevado del Ruiz, por medio de imágenes satelitales entre los años 1959 y 2014, en relación a esto realiza un análisis del comportamiento de temperatura en los años anteriormente mencionados. A la hora de identificar la cobertura del área glaciaria y demás coberturas, utiliza el método de clasificación supervisada haciendo uso del algoritmo de Máxima Probabilidad en conjunto con fotografías aéreas, determinando el área glaciaria y las temperaturas para los años 1985 (1686 ha – 4.1°C), 1996 (1336 ha – 4.3°C), 2003 (759 ha – 4.8°C) y 2014 (617 ha – 5.0°C), evidenciando el retroceso continuo del glaciario y el aumento de las temperaturas en cada año.

García (2016), hace un estudio de multitemporalidad del retroceso glaciario para el Volcán Nevado del Huila para los años 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016, a partir de imágenes Landsat 4, 5, 7 y 8, aplicando el método de Clasificación Supervisada, identificando las coberturas presentes y clasificándolas con el fin de determinar las áreas de cobertura glaciaria según el Corín Land Cover de Colombia (IGAC) calculando la pérdida de glaciario sufrida para cada año: 1989 – 1999 = 5.39 km<sup>2</sup>, 1999 – 2002 = 1.96 km<sup>2</sup>, 2002 – 2014 = 3.57 km<sup>2</sup> y 2014 – 2016 = 0.82 km<sup>2</sup>.

Monterroso (2016), para su trabajo de maestría determina el retroceso glaciario del PNNN comprendido entre los años 2010 y 2015, por medio de imágenes satelitales Landsat y Quickbird, también implementa imágenes Interferometría Diferencial SAR o DinSAR (RADARSAT-2) determinando así la deformación vertical de la cobertura glaciaria. Con las imágenes Landsat y Quickbird utiliza técnicas de índices espectrales como NDSI, NDSII, NDGI y NDSII 2 para mapear la cobertura glaciaria concluyendo que las técnicas más apropiadas para identificar estas coberturas son NDSI y NDSII ya que los resultados obtenidos por medio de

estas dos técnicas guardan mucha coherencia con lo que observa en las imágenes satelitales. Por otro lado, por medio de las imágenes RADARSAT-2 determina para el año 2014 una deformación vertical de los glaciares que componen el PNNN, concluyendo que utilizar este método para determinar la deformación vertical en el área de estudio es complicada ya que esta también se ve influenciada por la actividad magmática de los tres volcanes nevados y en especial en el VNR por la presencia de ceniza dificultando más la interpretación.

Como bien se demostró anteriormente, el satélite Landsat ha sido de gran importancia para realizar estudios de coberturas terrestres, especialmente de coberturas glaciares, donde casi todas las investigaciones se han hecho con productos de este satélite los cuales han dado muy buenos resultados. Ahora bien desde el año 2015 una nueva herramienta de teledetección surgió con el fin de dar un poco más de precisión a datos de observación terrestre, este satélite denominado Sentinel 2 surge de la necesidad de mejorar la precisión de datos de cobertura terrestre (ESA, 2015), a lo que las investigaciones relacionadas a monitorear las coberturas glaciares han sacado mucho provecho de estos productos, ya que su resolución espectral, resolución espacial y temporal han dado muy buena precisión para este tipo de investigaciones.

Egbers (2016), realiza un estudio para explorar métodos para el procesamiento de imágenes Sentinel 2A e identificar características glaciares. Para el procesamiento de estas imágenes el autor utiliza un software denominado SNAP el cual es creado por la Agencia Espacial Europea (ESA) para el tratamiento de imágenes Sentinel, en este software realiza una corrección atmosférica de imágenes Sentinel 2A las cuales tienen por defecto un nivel de procesamiento L1A, el cual posee correcciones atmosféricas en el Tope de la Atmosfera (TOA), correcciones geométricas y correcciones radiométricas. La corrección o el procesamiento que se le harán a las imágenes con SNAP es un procesamiento L2A el cual tendrá una corrección atmosférica en la parte inferior de la atmósfera (BOA), este proceso se realiza con un plugin del software el cual se denomina sen2cor. Adicional a esto el autor procede a comparar metodologías de combinación de bandas para determinar superficies de nieve y hielo, el autor realiza la comparación entre metodologías de Parece (combinación de bandas 8A, 11 y 12), Portengen (combinación de bandas 11, 8A y 4) y NASA (combinación de bandas 11, 8A y 3), donde concluye que cualquiera de los tres métodos propuestos es igual de eficaces a la hora de diferenciar superficies de nieve y hielo.

Paul et al. (2016), realiza un estudio de teledetección glaciar con imágenes de Sentinel 2 (MSI) para identificar extensiones glaciares y facies superficiales (nieve, hielo, sombras), las cuales tienen un nivel de procesamiento L1C lo que quiere indicar que tienen correcciones topográficas y correcciones atmosféricas en el tope de la atmósfera (TOAR) y compararlos con imágenes de Landsat 8 (OLI). En este trabajo aplican métodos de relación de bandas, para este caso bandas del VNIR (10m - espectro visible) y el SWIR (20m - infrarrojo de onda corta) en donde con Sentinel 2 utilizan la relación MSI4/MSI11 y MSI8/MSI11, donde ambas relaciones presentan resultados similares y muy precisos, en comparación con la relación de

bandas de Landsat 8, donde la resolución de sus bandas es un poco mayor que las de Sentinel 2 pero muestra resultados muy semejantes utilizando las bandas pancromática (15m) y SWIR (30m) ósea OLI8/OLI6. También hacen referencia al utilizar un DEM de mejor resolución para dar mejor precisión en la visualización de los datos ya que la corrección topográfica que poseen las imágenes del Sentinel 2 están ortorectificadas con el PlanetDEM de 90 m, por lo que los autores hacen necesario mejorar este procesamiento con un DEM de mejor resolución.

Alpala (2016), realiza un estudio de la evolución temporal del sistema glaciar Volcán Nevado del Huila (VNH) entre los años 1987 y 2016, por medio de imágenes Landsat y ASTER, mediante técnicas de Clasificación Supervisada y Cociente entre bandas (*ratio band*), delimitando así las zonas glaciares del VNH y relacionado a esto el retroceso glaciar comprendido entre los años anteriormente citados, también hace un análisis de los factores que han provocado este retroceso continuo, asociándolo a causas de comportamiento común del glaciar debido al cambio climático o actividad volcánica, relacionando esta última causa al progresivo retroceso del glaciar en los últimos años para el VNH.

En el territorio colombiano se ha trabajado sobre el tema de retroceso glaciar demostrando que en los glaciares colombianos se ha visto un retroceso significativo de estos cuerpos al pasar los años y al incrementar las condiciones climáticas.

## 5. METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizó información que previamente se solicitó al IDEAM, como parte de la actualización del inventario de los glaciares colombianos, donde a partir de imágenes satelitales Sentinel (2A) las cuales fueron proporcionadas por el instituto o descargadas de la plataforma Copernicus y Modelos de Elevación del Terreno (SRTM y ASTER GDEM2) se obtienen parámetros tanto topográficos como de área glaciar para el año 2017, esta cobertura glaciar se analizará y se procederá a determinar el retroceso con respecto al área para el año 2016, por medio de metodologías ampliamente utilizadas alrededor del mundo, donde han sido muy efectivas para el monitoreo de estas superficies, las cuales serán de gran importancia para el trabajo. El software que se utilizará para el análisis y presentación de los resultados es ArcGIS 10.3 y se utilizará ERDAS IMAGINE 2015 para el tratamiento de las imágenes.

Una vez obtenido los resultados se realiza un análisis multitemporal de cobertura glaciar para determinar cuánto ha sido el retroceso de estas superficies. Toda esta información será de vital importancia para la actualización del inventario de los glaciares colombianos. A continuación, se explicará más detalladamente el proceso para llegar a los resultados requeridos.

### 5.1. Fase 1 - Adquisición de la información

#### 5.1.1. Información suministrada por el IDEAM

Previamente se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), información disponible sobre los glaciares colombianos, por lo cual el IDEAM proporcionó información como:

- Geodatabase de límites glaciares para diferentes épocas.
- Delimitaciones Unidades Administrativas.
- Imagen multiespectral y DEM 5mt (Sierra Nevada de Santa Marta) realizado por la FAC (Fuerza Aérea Colombiana) para el IDEAM.

Además de la información suministrada, el IDEAM realizó asesorías pertinentes con personal especializado en el tema con el fin de prestar la ayuda necesaria para la finalización óptima del proyecto.

#### 5.1.2. Imágenes satelitales

Para los objetivos del trabajo se utilizaron imágenes satelitales Sentinel 2, las cuales fueron descargadas de la plataforma *Copernicus*, la cual pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en Inglés). La descarga de estas imágenes satelitales es gratuita, solo basta con generar un usuario para poder adquirir los productos (Figura 20).

Como recomendación por parte de Jorge Luis Ceballos Liévano, profesional especializado en glaciología del IDEAM, la descarga de las imágenes de los glaciares colombianos debe ser en fechas de temporada seca por lo que los meses de diciembre y enero son los más apropiados para la adquisición de estas imágenes, también una temporada apropiada es la de julio y agosto.

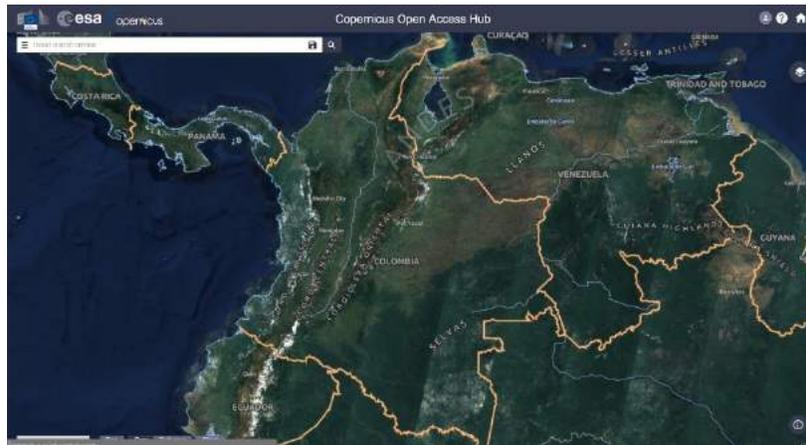


Figura 20: Interfaz plataforma Copernicus <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Una vez revisado todas las imágenes disponibles en la plataforma para el año 2017 de cada glaciar, se procedió a escoger las imágenes teniendo en cuenta algunos factores como: calidad de la imagen, baja o nula nubosidad y fecha de adquisición (temporada seca) esto con el fin de asegurar que no se observen mantos de nieve muy pronunciados lo que dificultaría la delimitación glaciar. Las imágenes elegidas para el trabajo teniendo en cuenta los factores anteriores se pueden detallar en la Tabla 10.

<b>Glaciar</b>	<b>Fecha Adquisición</b>
Volcán Nevado Santa Isabel ( <b>VNSI</b> )	3 de junio de 2017
Volcán Nevado del Ruiz ( <b>VNR</b> )	3 de junio de 2017
Volcán Nevado del Tolima ( <b>VNT</b> )	3 de febrero de 2017
Volcán Nevado del Huila ( <b>VNH</b> )	4 de abril de 2017
Sierra Nevada del Cocuy o Güicán ( <b>SNCG</b> )	22 de diciembre de 2017
Sierra Nevada de Santa Marta ( <b>SNSM</b> )	10 de febrero de 2017 (FAC)

Tabla 10: Imágenes seleccionadas para cada glaciar con fecha de adquisición en temporadas secas.

### 5.1.3. Modelo de Elevación del Terreno

Los Modelos de Elevación del Terreno o Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) con los cuales se trabajará en el proyecto son el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM2 (Global Digital Elevation Model Version 2), los cuales fueron descargados de la plataforma *LP DAAC* (Centro de

Archivo Activo de Procesos Terrestres), la cual pertenece a la NASA en convenio con el Servicio Geológico de Los Estados Unidos (USSG por sus siglas en ingles). Es una herramienta de búsqueda de datos específicos del sistema de información de la nasa. Por medio de esta plataforma se puede llegar a descargar gratuitamente información relacionada a DEM's, especialmente SRTM y ASTER GDEM2 (Figura 21).

Por otra parte, para la SNSM se trabajará con un DEM de 5 mt (año 2017) realizado por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en convenio con el IDEAM, este DEM el cual es un insumo muy importante, ya que con el nivel de detalle que maneja se puede llegar a datos mucho más precisos en cuanto a parámetros topográficos del glaciar.

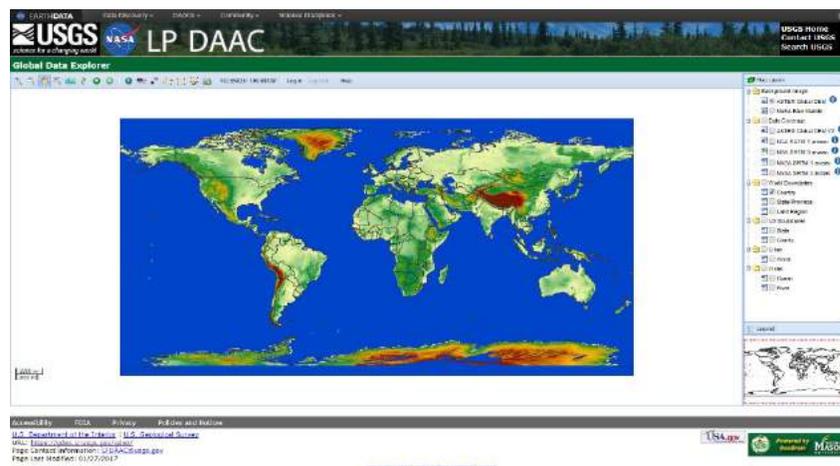


Figura 21: Interfaz plataforma LP DAAC (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).

## 5.2. Fase 2 – Procesamiento de la Información

### 5.2.1. Procesamiento de las Imágenes satelitales

El procesamiento de imágenes satelitales consta de realizar una serie de correcciones necesarias para el uso de estas, especialmente en trabajos de clasificación de imágenes (Hall, 1987; Rott, 1994). Las correcciones son una serie de algoritmos que se aplican a las imágenes con el fin de corregir ciertos aspectos de las imágenes en el momento de su adquisición con el fin de obtener datos más confiables (Chander et al. 2009; Chuvieco y Hantson, 2010), estas correcciones son geométricas, radiométricas, topográficas y atmosféricas.

- **Corrección Geométrica:** Esta corrección consiste en asignar a cada pixel su coordenada geográfica correspondiente (Cope, 2014).
- **Corrección Radiométrica:** Consiste en convertir los niveles digitales a radiación recibida por el sensor (Cope, 2014).

- **Corrección Atmosférica:** Esta corrección se aplica para eliminar las interferencias producidas por la absorción, dispersión y refracción (Cope, 2014).
- **Corrección Topográfica:** Corrigen las diferencias de radiación entre zonas de solana y umbría (Cope, 2014).

Las imágenes Sentinel 2A tienen un nivel de procesamiento L1C, lo que significa que posee correcciones básicas como radiométrica, geométrica y atmosférica, por lo que los valores de reflectancia están en la parte superior de la atmosfera (TOA, por sus siglas en inglés) (ESA, 2015), por lo que algunos autores recomiendan trabajar con este nivel de procesamiento (Paul et al. 2016).

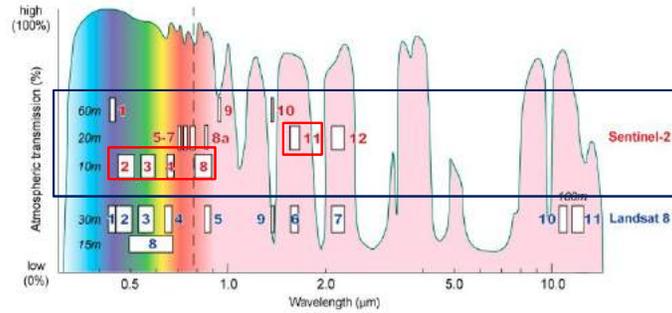
También existe un nivel de procesamiento superior al L1C denominado L2A, este consiste en realizar correcciones en la parte inferior de la atmosfera (BOA, por sus siglas en inglés) (Figura 22), este procesamiento es realizado por el usuario por medio del software **SNAP** utilizando un plugin denominado **sen2cor**. NOTA: Este procesamiento no se aplicará a las imágenes del trabajo ya que por problemas de incompatibilidad del software no ha sido posible realizar este tratamiento a las imágenes.

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1B	Top-of-atmosphere radiances in sensor geometry	Systematic generation and on-line distribution	27 MB (each 25x23km <sup>2</sup> )
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution	500 MB (each 100x100km <sup>2</sup> )
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry (prototype product)	Generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	600 MB (each 100x100km <sup>2</sup> )

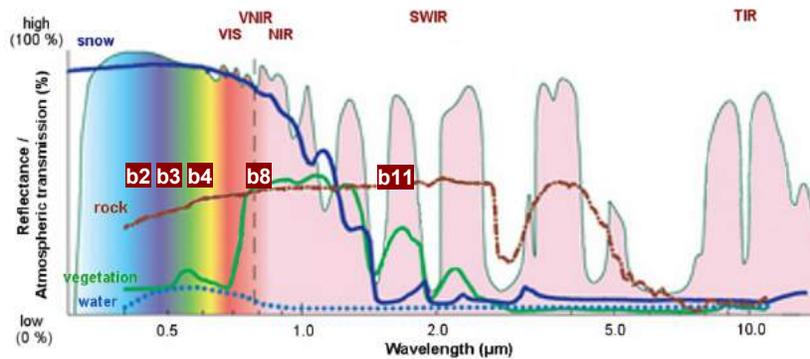
**Figura 22:** Nivel de procesamiento de las imágenes Sentinel 2. El recuadro rojo es el nivel con la que se puede adquirir las imágenes (ESA, 2015).

### 5.2.2. Delimitación Área Glaciar, Co-Registración y Parámetros Topográficos

Para el mapeo de cobertura glaciar existen técnicas que son ampliamente utilizadas a la hora de identificar estas superficies glaciares (Hall, 1987). Para este trabajo se utiliza la metodología de relación de bandas (*Ratio Bands*) y de umbrales (thresholds) (Hall, 1987; Williams et al. 1991; Rott, 1994; Jacobs et al. 1997; Fuentes, 2008; Pellikka y Rees, 2010; Medina y Mejía, 2010; Cope, 2014; Egbers, 2016; Paul et al. 2016). Esta técnica es muy utilizada a la hora de determinar extensiones glaciares; generalmente con imágenes Sentinel 2 se utilizan las bandas VNIR (10m - espectro visible (b2-b3-b4-b8)) y SWIR (20m – infrarrojo de onda corta (b11)) (Figura 23), donde la nieve y el hielo tienen una alta absorción en el SWIR y una alta reflectancia en el VNIR (Figura 24), ocasionando una fuerte reflectancia espectral (Paul et al. 2016; Egbers, 2016).

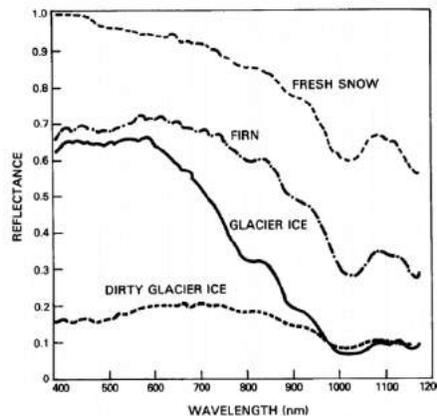


**Figura 23:** Disposición de las bandas según la longitud de onda para Sentinel 2 (recuadro azul) (Kaab et al. 2016). Las bandas a utilizar en el trabajo son 2, 3, 4, 8 (10m - VNIR) y 11 (20m – SWIR).



**Figura 24:** Reflectancia y transmisión atmosférica de algunas coberturas terrestres y relación con las bandas espectrales a trabajar (Modificado de Egbers, 2016).

Asociado a lo anterior es de vital importancia detallar un poco la forma como se comportan las firmas espectrales de las superficies de nieve y hielo glaciar en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (Figura 25), donde se puede observar que la nieve fresca (Fresh Snow) posee una alta reflectancia (0.5 – 1.0) en el espectro visible e infrarrojo cercano y el hielo glaciar (Glacier Ice) posee una baja a mediana reflectancia (0.1 – 0.6 ~) un poco más alta en el visible y más baja en el infrarrojo cercano (Bippus, 2011).



**Figura 25:** Reflectancias de las superficies de nieve y hielo en el espectro visible y en el infrarrojo cercano (Bippus, 2011).

Esta metodología de relación de bandas realiza una muy buena discriminación entre coberturas de hielo, nieve, suelo y roca, también es un método muy útil a la

hora de diferenciar las sombras presentes en las superficies glaciares, y diferenciar las nubes de superficies con nieve (WMO, 2012).

Para este proceso se utiliza primero que todo el software ERDAS IMAGINE 2014, en el cual se realizara una serie de procedimientos a las imágenes, como remuestreo, apilamiento de las imágenes (layerstack) y recorte de la zona de interés.

#### **5.2.2.1. Pre-procesamiento imágenes (software ERDAS 2014)**

Primero que todo en el software ERDAS se realizaran una serie de procedimientos a las imágenes satelitales Sentinel 2 con el fin de prepararlas para el post-proceso.

A partir de la descarga de la imagen de cada glaciar se trabajarán con las bandas b2, b3, b4, b8 y b11, estas son las bandas que se cargaran al software ERDAS para la visualización de estas (ver Anexo 1), posteriormente se procede primero que todo a remuestrear la banda 11, ya que del juego de bandas que se escogieron es la única que posee una resolución de pixel de 20 mt por ende se procede a reducir el tamaño del pixel a 10 mt, esto con el fin de que no se generen errores ya que al trabajar con imágenes raster los pixeles deben tener el mismo tamaño de celda (ver Anexo 2). A continuación, se procede a generar un Layer Stack o apilamiento de bandas, esto se hace con el fin de crear una imagen multibanda para realizar combinaciones **RGB** y analizar los objetos de la superficie dependiendo del espectro de emisión de estos, para este caso las superficies glaciares. Para una visualización correcta de estas se utiliza la combinación **R: b11, G: b8 y B: b4**, con esta combinación lo que se produce es la visualización de todos los objetos que poseen alta reflectancia de la luz solar como lo es la nieve y el hielo glaciar, por lo que estas superficies se observaran de un azul intenso. También se utiliza la combinación **R: b4, G: b3 y B: b2**, esta combinación visualiza los colores verdaderos de todos los objetos en superficie (ver Anexo 3). Ya realizado el layer stack se procede a recortar la zona de la imagen que posea masas glaciares con el fin de comenzar a realizar la delimitación glaciar (ver Anexo 4).

#### **5.2.2.2. Delimitación y cálculo de área glaciar (software ArcGis 10.3)**

La metodología utilizada para la delimitación glaciar se denomina relación de bandas (band ratio). Uno de los primeros autores en hablar sobre esta metodología fue Hall (1987), donde realiza un estudio para la caracterización de cuerpos de hielo y nieve por medio de datos obtenidos del satélite Landsat TM, para esto estudia la reflectancia de estos cuerpos por medio de la relación de bandas TM4 donde la reflectancia de estos cuerpos es alta y TM5 donde la reflectancia de estos cuerpos es baja.

El mismo principio funciona para las imágenes Sentinel 2 en donde, en la banda b4 (665 nm - VIS) la reflectancia de estos cuerpos es alta y en la banda b11 (1610

nm - SWIR) la reflectancia es baja, ambas con una resolución espacial de 10 mt y 20 mt respectivamente (Figura 26).

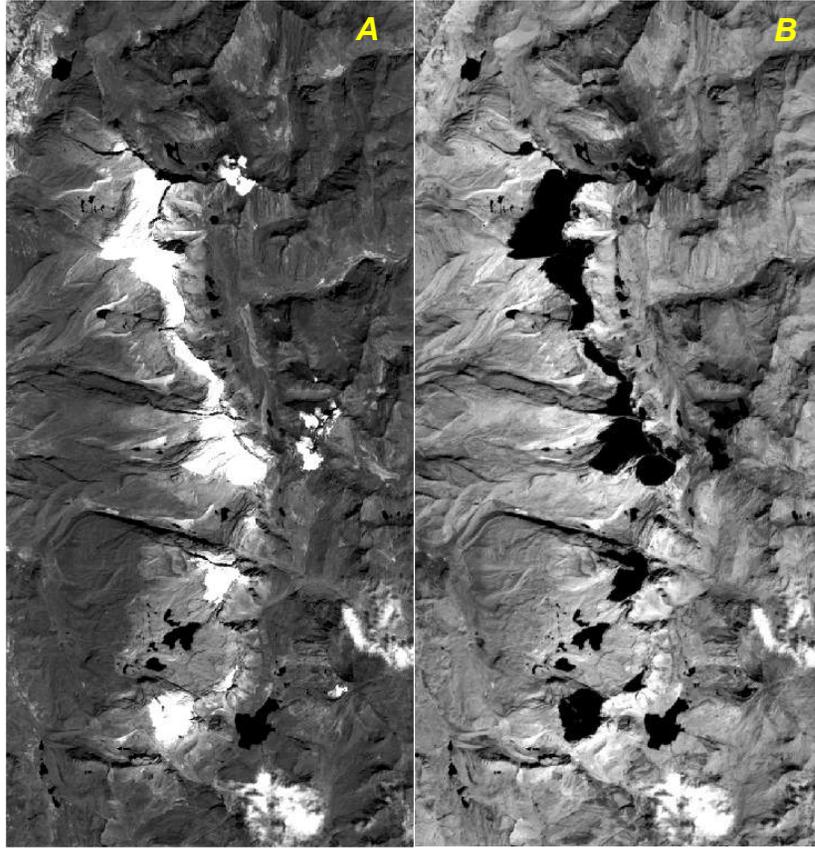


Figura 26: A. Banda 4 (VIS), se puede observar la alta reflectancia de la superficie glaciar. B. Banda 11 (SWIR), se puede observar la nula reflectancia de la superficie glaciar.

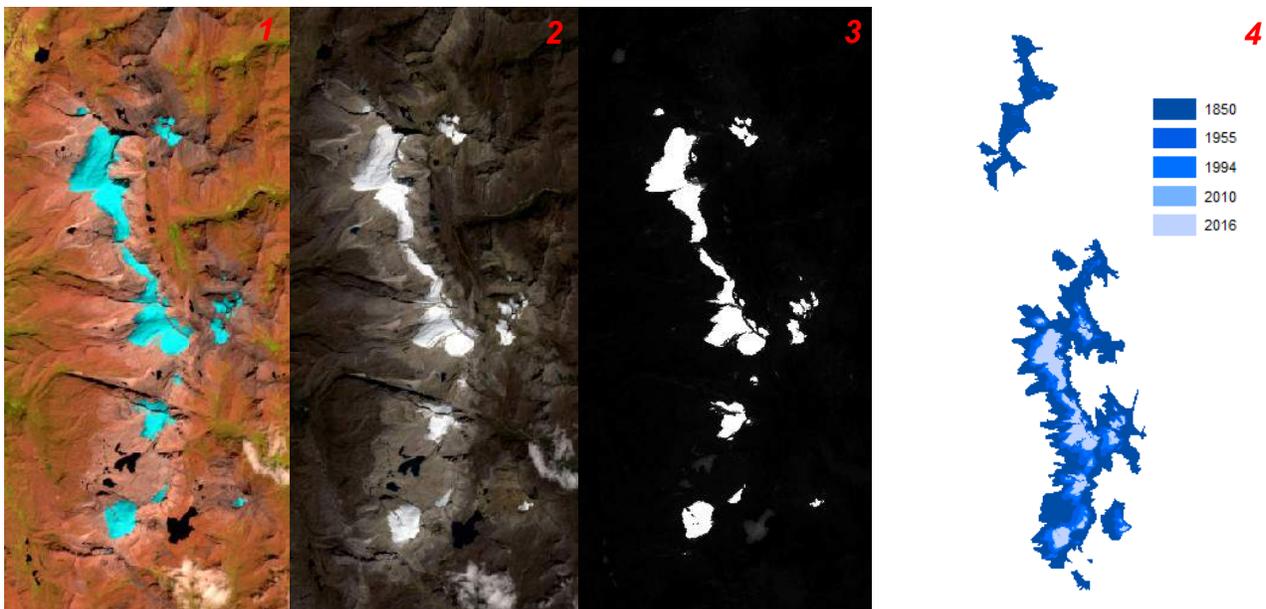
Esta metodología utiliza el consiente de dos bandas con alta reflectancia y baja reflectancia de las masas glaciares con el fin de obtener un raster en el cual se discrimine las demás coberturas y solo se pueda visualizar el glaciar, para esto se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Band Ratio} = \frac{\text{Float}(\text{banda}_x)}{\text{Float}(\text{banda}_y)}$$

Donde la **Banda\_X** sería la banda 4 (b4) de alta reflectancia y la **Banda\_Y** sería la banda 11 (b11) de baja reflectancia, recordando que esta reflectancia está relacionada con la cobertura glaciar y que los valores de reflectancia según el nivel de procesamiento de las imágenes son valores que están en la parte superior de la atmosfera (TOA). A partir de esta fórmula se calcula el cociente de estas dos bandas para generar un raster que visualmente representa las zonas glaciares (ver Anexo 5).

Una vez realizado todo el proceso para la delimitación glaciar por medio de la metodología de relación de bandas el cual se puede detallar en el Anexo 5, se procede a superponer el polígono de área glaciar generado sobre la imagen satelital observándose como este se ajusta al límite glaciar, cabe recalcar que en algunas zonas se presentan polígonos delimitando zonas no glaciadas y en otras el límite no concuerda ya sea por factores como sombras o por capas de ceniza, por lo que se hace necesario realizar una corrección manual de este polígono en dichas zonas, para esto es recomendable utilizar insumos como:

1. La imagen satelital en falso color (b11-b8-b4).
2. La imagen satelital en color verdadero (b4-b3-b2).
3. El raster producto de la relación de bandas (b4/b11).
4. Datos multitemporales de área glaciar (para el proyecto estos datos multitemporales fueron suministrados por parte del IDEAM).



Una vez corregido y ajustado el polígono se procede a determinar el área glaciar por medio de la herramienta *Calculate Geometry*, ya realizado esto se compara el resultado con los datos multitemporales para determinar cuánto fue el retroceso glaciar entre periodos.

### 5.2.2.3. Co-Registración MDT

La metodología a realizar para la corrección de errores relacionados con diferencias de elevación, sesgos de desplazamiento horizontal y vertical de los MDT es propuesta por Nuth y Kääb (2011) denominada Co-Registración, esta metodología se utiliza especialmente para determinar diferencias de elevación entre MDT (ASTER GDEM v2 y SRTM v3) y disminuir el desplazamiento que hay entre ellos con el fin de determinar correctamente los parámetros topográficos del área glaciar. Para esta metodología se debe tomar un MDT de referencia el cual

sería ASTER GDEM v2 y a partir de este se corrige el MDT SRTM el cual es con el que se calcularán los parámetros topográficos, esta metodología se puede detallar más a fondo en el Anexo 6.

#### 5.2.2.4. Cuencas Glaciares

Ya hecha la corrección del MDT (SRTM), se proceden a determinar las cuencas glaciares a partir del modelo de elevación con el fin de posteriormente calcular los parámetros topográficos para cada una de estas (ver Anexo 7). Esta información complementaria es de vital importancia ya que a partir de estos datos se pueden realizar posteriormente análisis muchos más detallados sobre la dinámica glacial e hidrológica de estos cuerpos.

#### 5.2.2.5. Calculo de Parámetros Topográficos

Estos parámetros ayudaran a identificar características exposición de cada uno de los glaciares. Paul et al. (2010), realizan una guía de como determinar los parámetros topográficos para zonas glaciares generando así un inventario de datos a partir de datos digitales. En la Tabla 12 se recopilan los parámetros básicos que se necesitan identificar para cada uno de los glaciares.

Name	Item	Symbol
surface area	area_km2	S
length (max.)	length	$l_{max}$
minimum elevation	min	$h_{min}$
maximum elevation	max	$h_{max}$
mean elevation	mean	$h_{mean}$
median elevation	median	$h_{medi}$
mean slope	slope_deg	a
mean aspect	aspect_360	$\phi_{360}$
aspect sector	aspect_sec	$\phi_{sec}$

**Tabla 11:** Recopilación de los parámetros topográficos a identificar para cada uno de los glaciares (Paul et al. 2010).

La metodología paso a paso se puede detallar en el Anexo 8.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Área Glaciar 2017

A partir de la metodología anteriormente descrita se obtienen los resultados de área para el año 2017 de cada uno de los glaciares, se procede a calcular su respectiva área, con el fin de realizar una comparación con las áreas glaciares del año 2016 (información suministrada por el IDEAM) para determinar el retroceso de cada uno de los glaciares (Tabla 13). Según el IDEAM (2012), la pérdida anual en promedio durante las últimas cinco décadas para los glaciares colombianos es aproximadamente entre 3% y 5% anualmente, si bien este retroceso está ampliamente relacionado a fenómenos de variabilidad climática como el fenómeno del Niño el cual incide en el clima del país de forma que disminuyen las lluvias y aumentan las temperaturas, como también las características topográficas y geológicas, las cuales también inciden en gran magnitud sobre dichas áreas glaciares, recordemos que muchos de estos glaciares se encuentran sobre volcanes activos y que gracias a esta actividad estas superficies tienden también a acelerar.

Glaciar	Imagen	Año	Fecha	Área (km <sup>2</sup> )	Retroceso (Km <sup>2</sup> )	% Retroceso
VNH	Sentinel 2A	2016	30/01/2016	7.472469	0.173099	2.3
		2017	4/04/2017	7.29937		
VNT	Sentinel 2A	2016	30/01/2016	0.62989	0.053623	8.5
		2017	3/02/2017	0.576267		
VNSI	Sentinel 2A	2016	30/01/2016	1.03917	0.37577	36.16
		2017	3/06/2017	0.6634		
VNR	Sentinel 2A	2016	30/01/2016	9.035617	0.633777	7.0
		2017	3/06/2017	8.40184		
SNCG	Sentinel 2A	2016	5/06/2016	13.896763	0.571791	4.1
	Sentinel 2B	2017	22/12/2017	13.324972		
SNSM	Sentinel 2A	2016	19/02/2016	7.103333	0.448283	6.3
	FAC	2017	10/02/2017	6.65505		

**Tabla 12:** Área para cada superficie glaciar del año 2017 y retroceso glaciar con respecto al año 2016.

A continuación, se detallará más la información anteriormente recopilada.

### 6.1.1. Área Glaciar VNH

Para el año 2016 el IDEAM reportaba un área glaciar para el VNH de 7.472469 km<sup>2</sup> a partir de imágenes Sentinel 2; para el año 2017 también a partir de imágenes Sentinel 2 se obtiene un área glaciar de 7.29937 km<sup>2</sup>, en relación a los datos anteriores se observa un retroceso de 0.173099 km<sup>2</sup> lo que se traduce en un 2.3% de pérdida con respecto al área glaciar del año 2016. En la Figura 27 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidencio a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 proporcionada por el IDEAM y área glaciar 2017 elaboración propia).

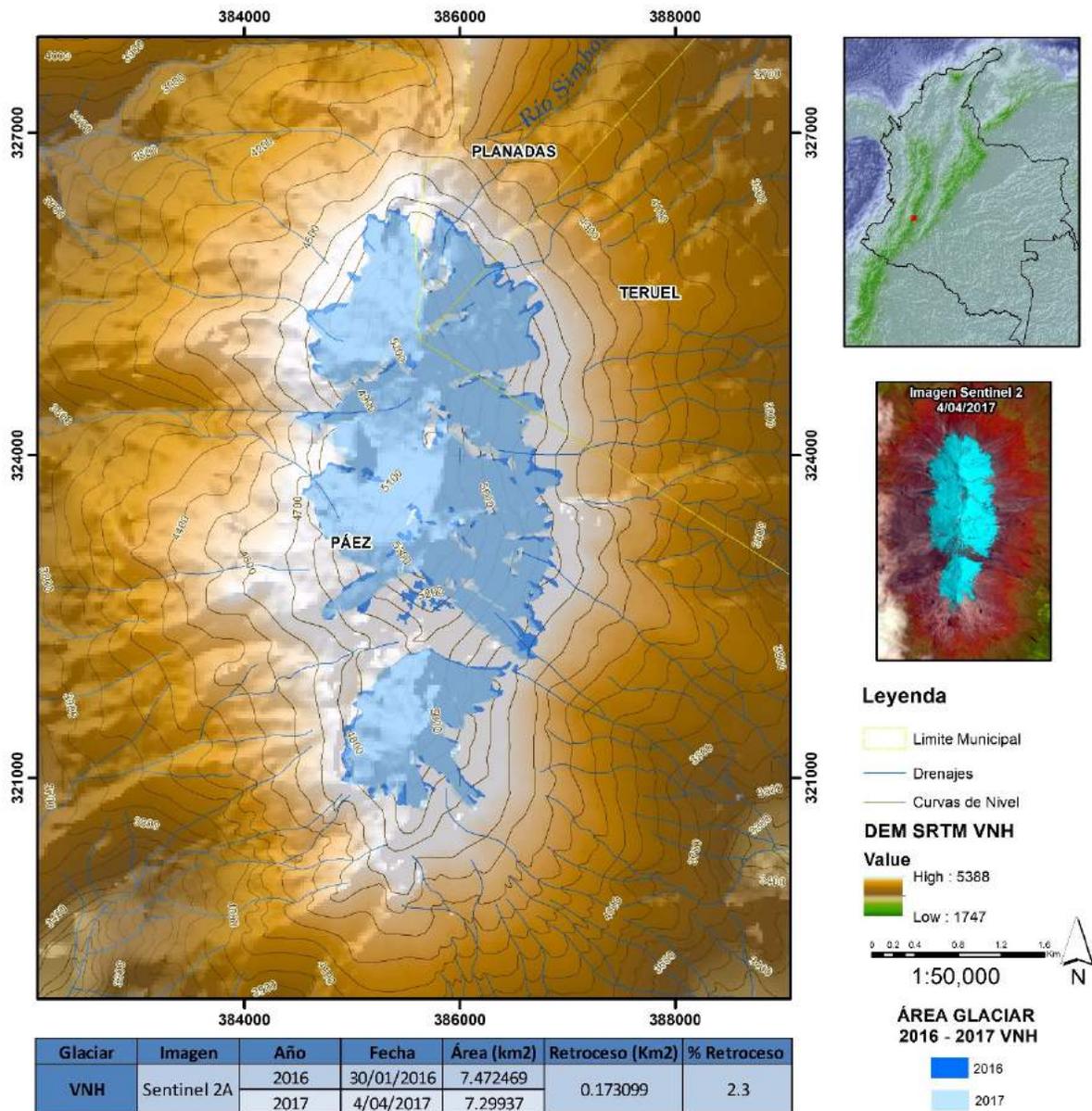


Figura 27: Área y retroceso glaciar para el VNH comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

### 6.1.2. Área Glaciar VNT

Para el año 2016 el IDEAM reportaba un área glaciar para el VNT de 0.62989 km<sup>2</sup> a partir de imágenes Sentinel 2, para el año 2017 se obtiene un área glaciar de 0.576267 km<sup>2</sup>, en relación a los datos anteriores se obtiene un retroceso de 0.053623 km<sup>2</sup> lo que se traduce en un 8.5% de pérdida con relación al área glaciar del año 2016. En la Figura 28 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidencio a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 proporcionada por el IDEAM y área glaciar 2017 elaboración propia).

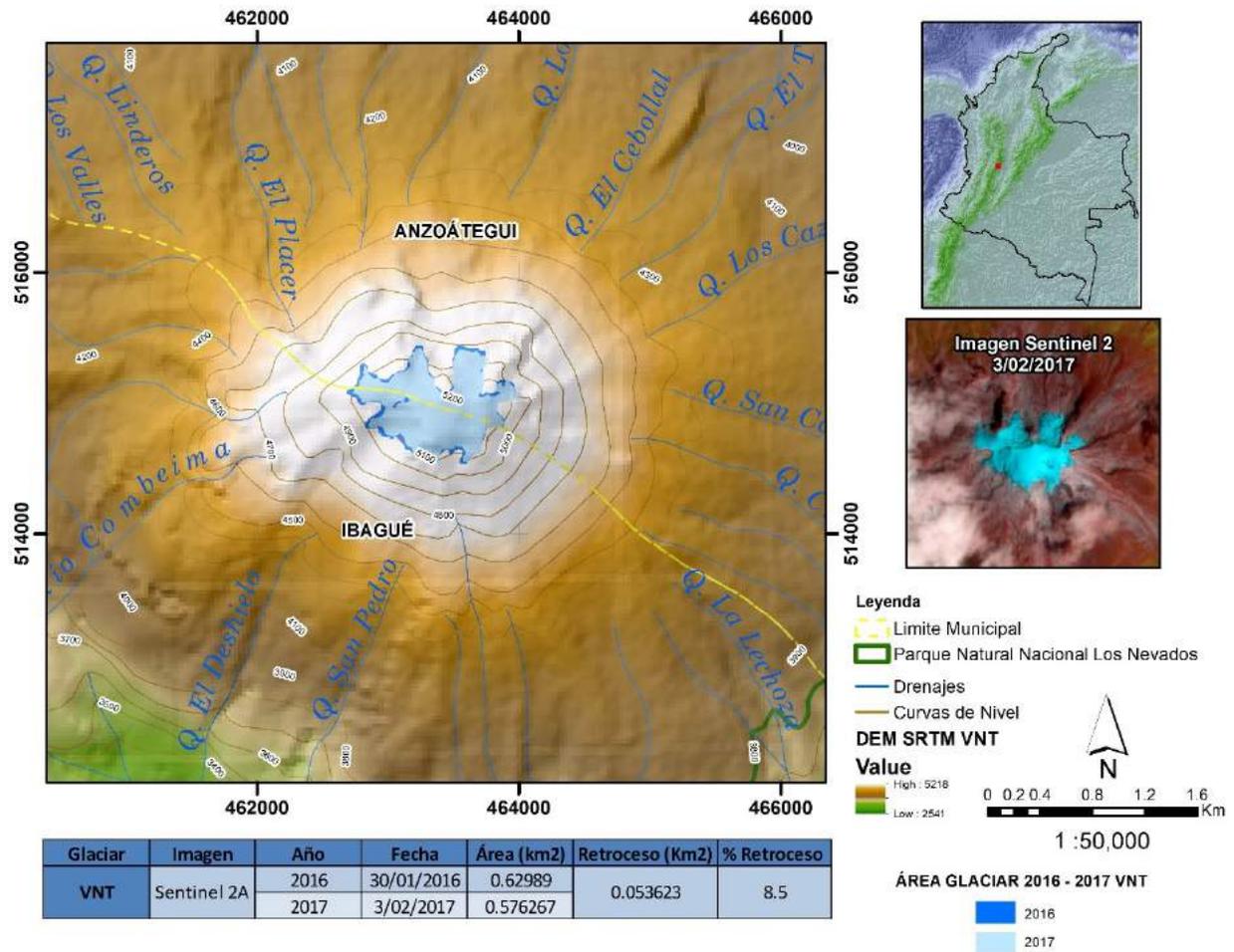


Figura 28: Área y retroceso glaciar para el VNT comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

### 6.1.3. Área Glaciar VNSI

El área glaciar para el VNSI presentó significativos cambios en un corto periodo de tiempo, el IDEAM para el 2016 calculó un área de 1.0391 km<sup>2</sup> de esta superficie, para el año 2017 se obtuvo un área de 0.6634 km<sup>2</sup>, para lo cual se obtiene un retroceso glaciar de 0.37577 km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 36.16% de pérdida con relación al área glaciar del año 2016. La gran cantidad de pérdida de área glaciar para el VNSI se puede interpretar de varias formas, teniendo en cuenta que de los seis glaciares que posee Colombia el glaciar del VNSI es el de menor altura, lo que ocasiona que sea más susceptible a procesos que provoquen el aumento del retroceso del área glaciar. Un factor que no se puede descartar es la actividad volcánica de la zona, recordando que en la última década el VNR ha tenido procesos de emisión de ceniza, en el cual constantemente se presenta expulsión de este material y asociado a esto el transporte y posterior depositación de este sobre el glaciar del VNSI el cual puede ser un factor que afecte el albedo de esta superficie. En la Figura 29 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidenció a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 proporcionada por el IDEAM y área glaciar 2017 elaboración propia).

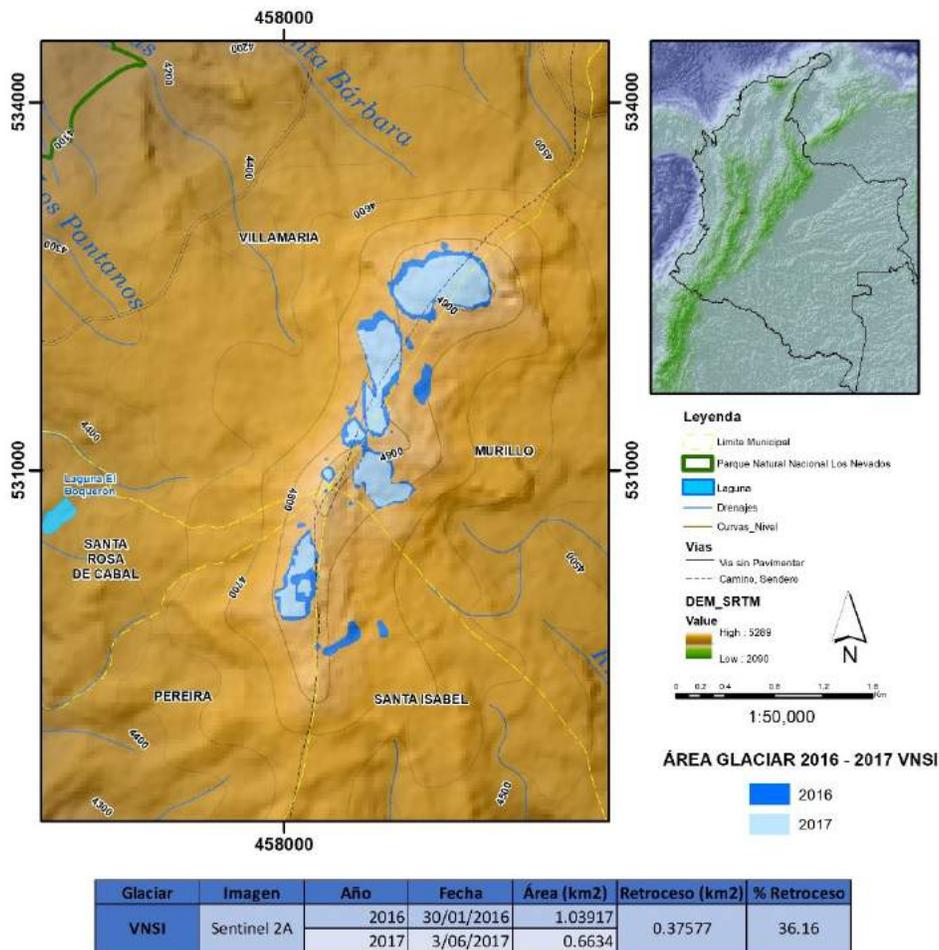


Figura 29: Área y retroceso glaciar para el VNSI comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

### 6.1.4. Área Glaciar VNR

Para el año 2016, el IDEAM reportaba un área glaciar para el VNR de 9.035617 km<sup>2</sup> por medio de imágenes satelitales Sentinel 2, para el año 2017 también por medio de imágenes Sentinel 2 se obtiene un área glaciar de 8.40184 km<sup>2</sup>, se puede observar que hay un retroceso glaciar de 0.633777 km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 7% de pérdida glaciar con respecto al área del año 2016. En la Figura 30 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidencio a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 proporcionada por el IDEAM y área glaciar 2017 elaboración propia en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano - SGC).

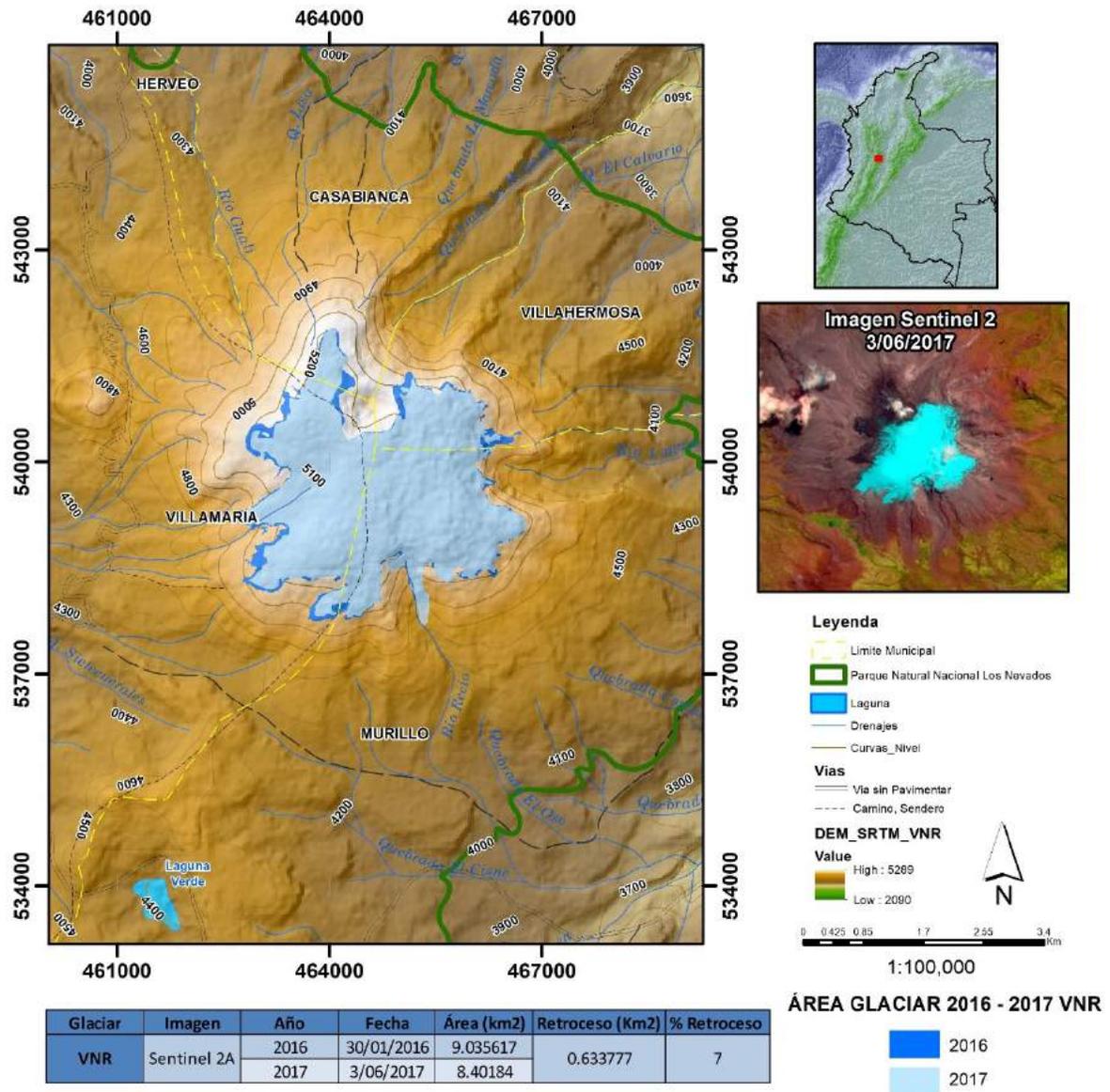


Figura 30: Área y retroceso glaciar para el VNR comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

### 6.1.5. Área Glaciar SNCG

El IDEAM para el año 2016 calculaba un área glaciar para la SNCG de 13.896763 km<sup>2</sup> a partir de imágenes Sentinel 2, para el año 2017 se obtiene un área glaciar de 13.324972 km<sup>2</sup> también a partir de imágenes Sentinel 2, se puede observar que hay un retroceso glaciar de 0.571791 km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 4.1% de pérdida glaciar con respecto al área del año 2016. En la Figura 31 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidencio a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 proporcionada por el IDEAM y área glaciar 2017 elaboración propia).

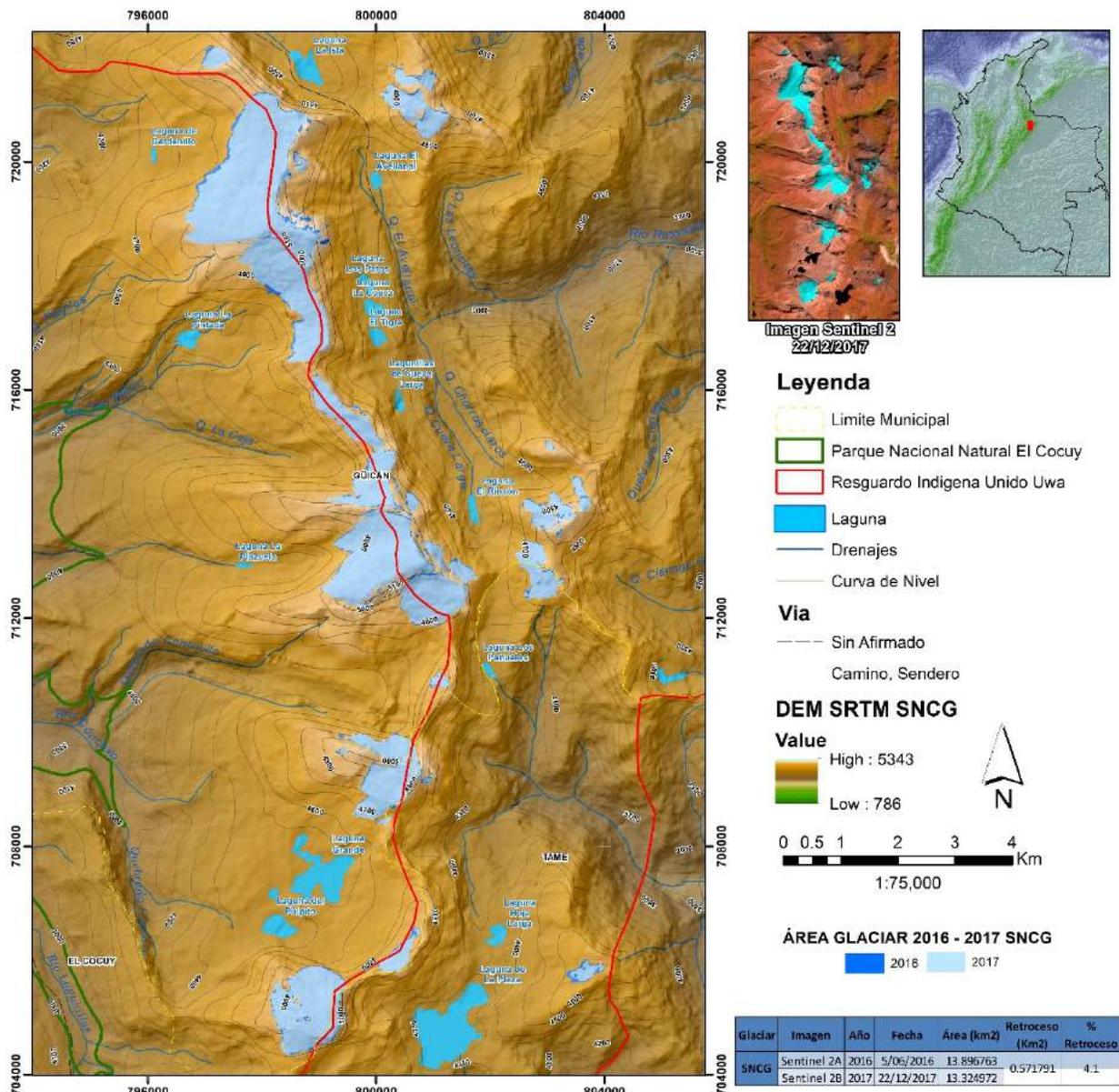


Figura 31: Área y retroceso glaciar para el SNCG comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

### 6.1.6. Área Glaciar SNSM

El IDEAM para el año 2016 calculaba un área glaciar para la SNSM de 7.103333 km<sup>2</sup> a partir de imágenes Sentinel 2, para el año 2017 se obtiene un área glaciar de 6.65505 km<sup>2</sup> a partir de imágenes obtenidas por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y el IDEAM en convenio interadministrativo, se puede observar que hay un retroceso glaciar de 0.448283 km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 6.3% de pérdida glaciar con respecto al área del año 2016. En la Figura 32 se puede observar el área glaciar para cada año y el retroceso que se evidencio a partir de los resultados en este periodo de tiempo (área glaciar 2016 y 2017 proporcionada por el IDEAM).

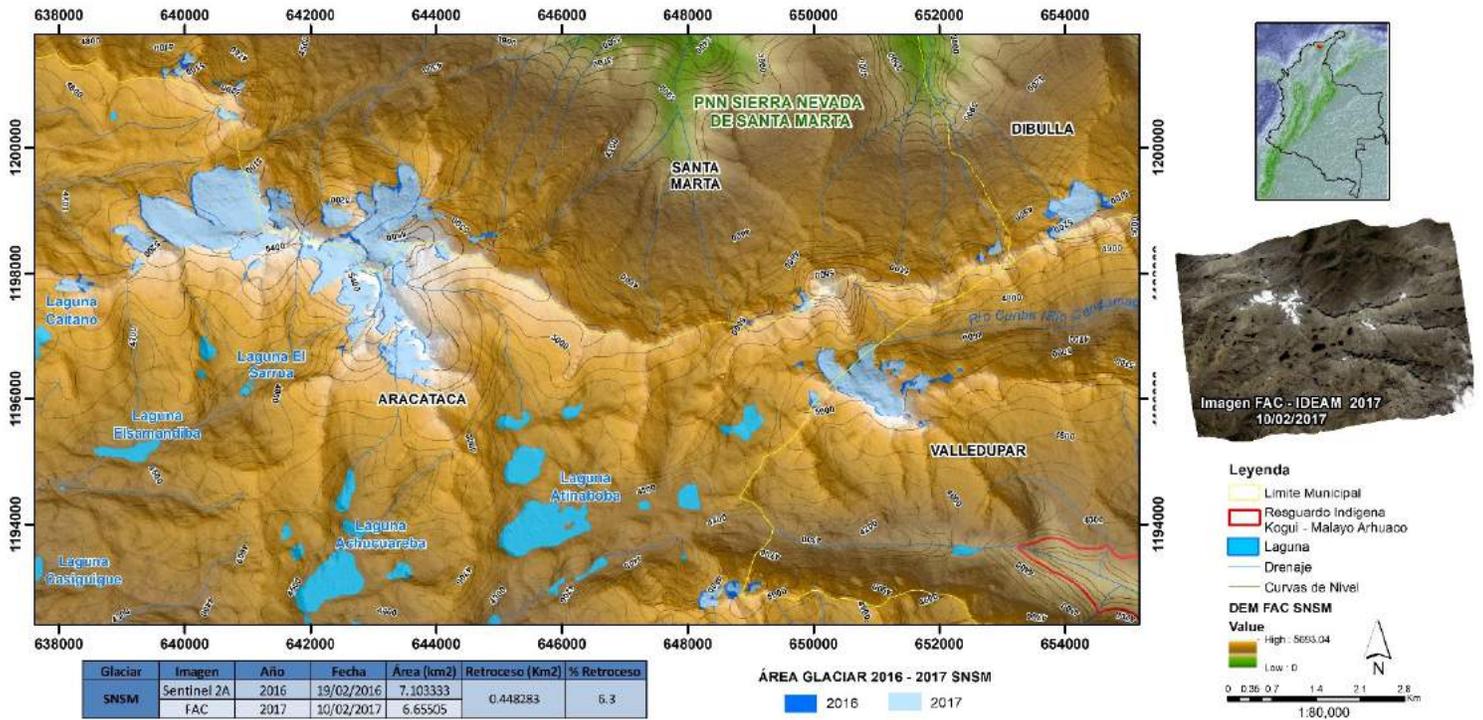


Figura 32: Área y retroceso glaciar para el SNSM comprendido entre los periodos 2016 y 2017.

## 6.2. Área Glaciar Municipios, CAR's, PNN y Cuencas

En este apartado se pretende dar a conocer que área glaciar pertenece para cuatro jurisdicciones como lo son Municipios, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), Parques Naturales Nacionales (PNN) y Subzonas Hidrográficas (SZH - Cuencas) para el periodo 1850 – 2017.

### 6.2.1. Área Glaciar Municipios

#### 6.2.1.1. VNH

El glaciar del VNH está en la jurisdicción de los municipios de Páez, Planadas y Teruel, los cuales pertenecen al departamento del Cauca, Tolima y Huila respectivamente. En la tabla 14 se recopilarán los datos de área glaciar para todos los municipios para los años 1850, 1959, 1996, 2009, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Municipio por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNH	Cauca	Páez	1850	37.80	30.70	81.21
			1959	23.26	19.00	81.71
			1996	18.01	14.85	82.49
			2009	10.05	8.10	80.60
			2016	7.47	6.39	85.46
			2017	7.30	6.24	85.42
	Tolima	Planadas	1850	37.80	1.92	5.09
			1959	23.26	1.16	4.97
			1996	18.01	0.90	5.02
			2009	10.05	0.58	5.80
			2016	7.47	0.37	4.89
	2017	7.30	0.38	5.18		
	Huila	Teruel	1850	37.80	5.18	13.70
			1959	23.26	3.10	13.32
			1996	18.01	2.25	12.49
			2009	10.05	1.37	13.60
			2016	7.47	0.72	9.66
			2017	7.30	0.69	9.40

**Tabla 13:** Área glaciar VNH para los municipios de Páez, Planadas y Teruel para el periodo 1850 - 2017.

Ahora bien, en la Figura 33, se puede observar mucho mejor los valores anteriormente citados, se puede apreciar que, para todos los años comprendidos, el municipio de Páez (Cauca) es el que presenta la mayor cantidad de área glaciar, seguido del municipio de Teruel (Huila) y por último en menor proporción el municipio de Planadas (Tolima). A esto se puede asociar que el retroceso glaciar para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 24.6 km<sup>2</sup> para Páez, 1.54 km<sup>2</sup> para Planadas y 4.49 km<sup>2</sup> para Teruel. Aunque el retroceso glaciar es notorio es de notar que el cambio entre año a año no es tan significativo como para otros glaciares del territorio colombiano.

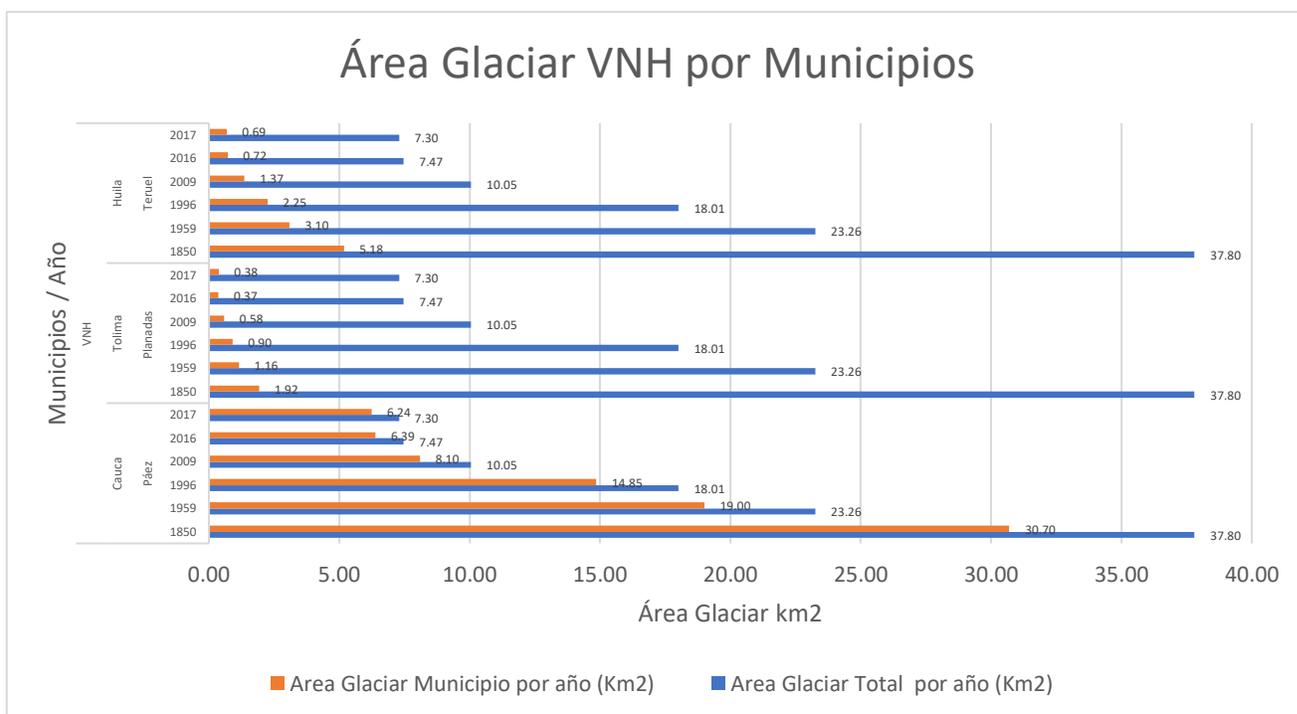


Figura 33: Valores de área glaciar para el VNH para los municipios de Páez, Planadas y Teruel para el periodo 1850 - 2017.

#### 6.2.1.2. VNT

El glaciar del VNT está en la jurisdicción de los municipios de Anzoátegui e Ibagué, los cuales pertenecen al departamento del Tolima. En la tabla 15 se recopilarán los datos de área glaciar para estos municipios para los años 1850, 1955, 1996, 2010, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Municipio por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNT	Tolima	Anzoátegui	1850	8.57	4.86	56.72
			1955	3.03	1.70	56.11
			1996	1.70	0.86	50.81
			2010	0.75	0.35	46.26
			2016	0.63	0.31	49.14
			2017	0.58	0.29	49.57
		Ibagué	1850	8.57	3.71	43.28
			1955	3.03	1.33	43.89
			1996	1.70	0.84	49.19
			2010	0.75	0.40	53.74
			2016	0.63	0.32	50.86
			2017	0.58	0.29	50.43

Tabla 14: Área glaciar VNT para los municipios de Anzoátegui e Ibagué para el periodo 1850 - 2017.

Ahora bien, en la Figura 34, se puede observar los valores anteriormente citados, se puede apreciar que, para todos los años comprendidos, el municipio de Anzoátegui es el que presenta la mayor cantidad de área glaciaria con respecto al municipio de Ibagué ambos pertenecientes al departamento del Tolima. A esto se puede asociar que el retroceso glaciario para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 4.57 km<sup>2</sup> para Anzoátegui y 3.13 km<sup>2</sup> para Ibagué.

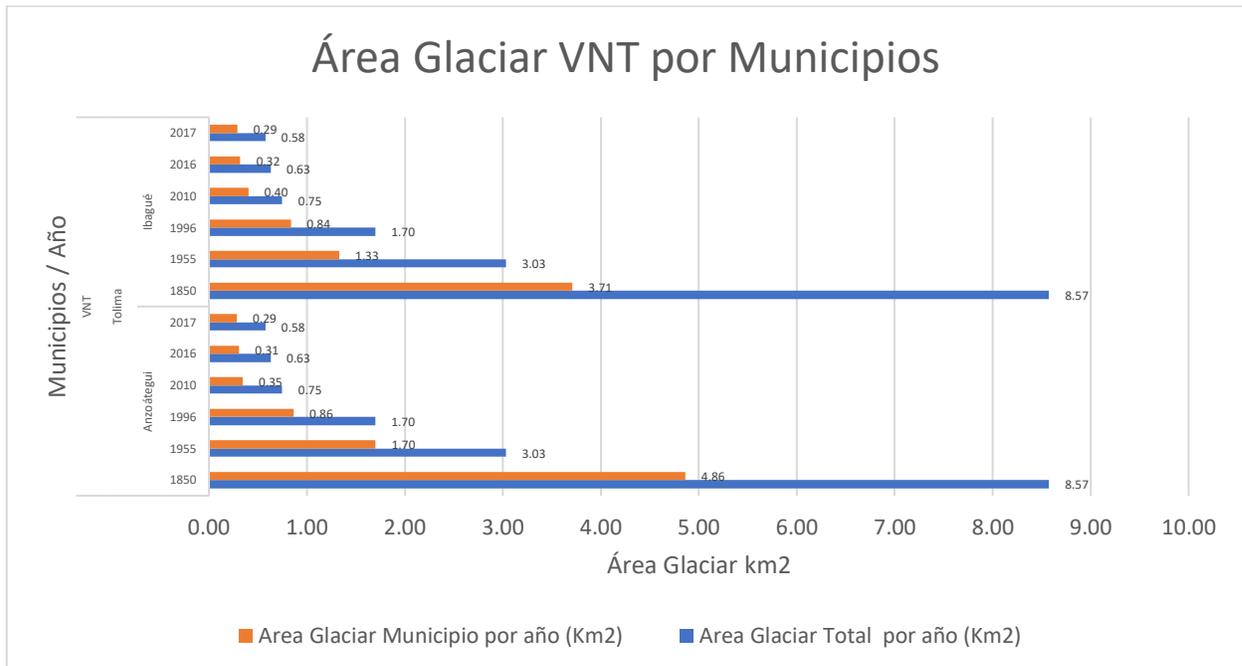


Figura 34: Valores de área glaciaria para el VNT para los municipios de Anzoátegui e Ibagué para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.1.3. VNSI

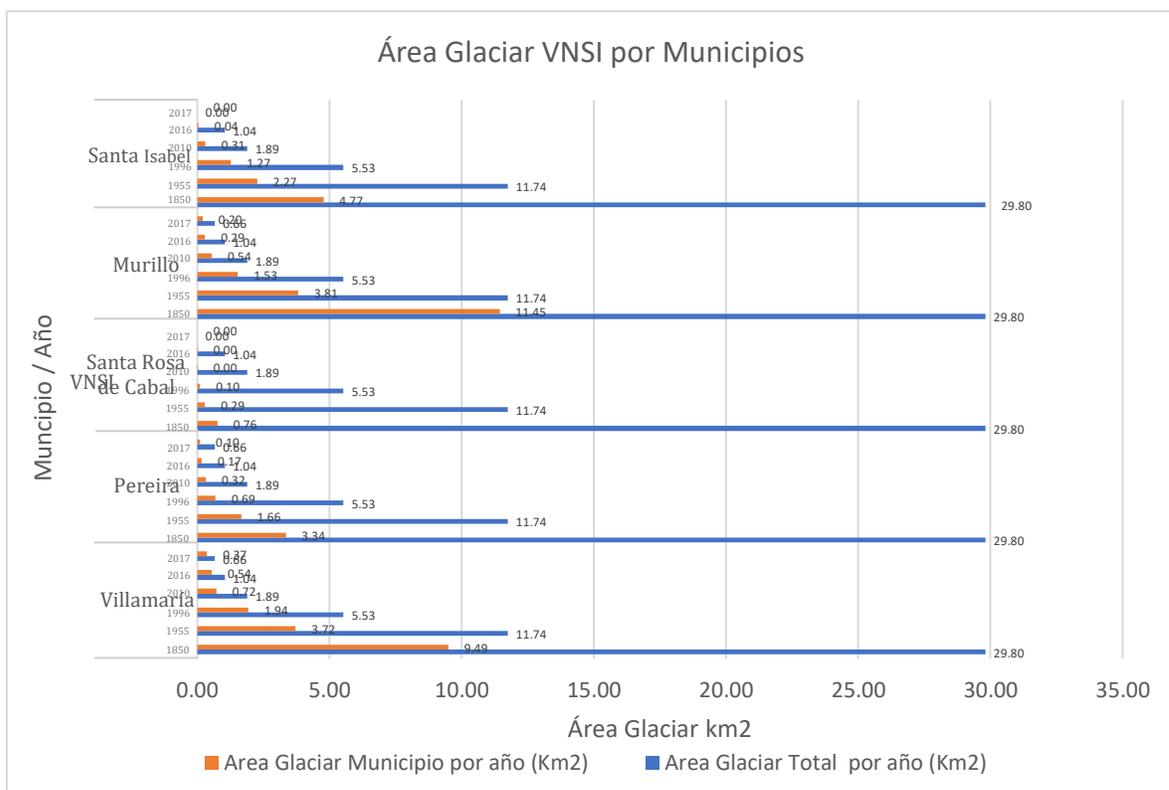
El glaciar del VNSI está en la jurisdicción de los municipios de Villamaria (Caldas), Pereira (Risaralda), Santa Rosa de Cabal (Risaralda), Murillo (Tolima) y Santa Isabel (Tolima). En la tabla 16 se recopilarán los datos de área glaciaria para cada uno de estos municipios para los años 1850, 1955, 1996, 2010, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciaria Total por año (Km2)	Área Glaciaria Municipio por año (Km2)	% de Área Glaciaria con respecto al total por año
VNSI	Caldas	Villamaria	1850	29.80	9.49	31.83
			1955	11.74	3.72	31.68
			1996	5.53	1.94	35.02
			2010	1.89	0.72	38.04
			2016	1.04	0.54	51.94
			2017	0.66	0.37	55.83
	Risaralda	Pereira	1850	29.80	3.34	11.22
			1955	11.74	1.66	14.13
			1996	5.53	0.69	12.45
			2010	1.89	0.32	16.81
			2016	1.04	0.17	16.17
			2017	0.66	0.10	14.37

Municipio	Año	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )			
		Villamaría	Pereira	Santa Rosa de Cabal	Murillo
Tolima	Santa Rosa de Cabal	1850	29.80	0.76	2.54
		1955	11.74	0.29	2.44
		1996	5.53	0.10	1.89
		2010	1.89	0.00	0.06
		2016	1.04	0.00	0.01
	2017	0.00	0.00	0.00	
	Murillo	1850	29.80	11.45	38.41
		1955	11.74	3.81	32.45
		1996	5.53	1.53	27.75
		2010	1.89	0.54	28.72
		2016	1.04	0.29	27.66
	2017	0.66	0.20	29.80	
	Santa Isabel	1850	29.80	4.77	16.01
		1955	11.74	2.27	19.30
		1996	5.53	1.27	22.90
2010		1.89	0.31	16.37	
2016		1.04	0.04	4.23	
2017	0.00	0.00	0.00		

**Tabla 15:** Área glaciar VNSI para los municipios de Villamaría, Pereira, Santa Rosa de Cabal, Murillo y Santa Isabel para el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 35, se puede observar los valores anteriormente citados, se puede apreciar que para todos los años comprendidos (1850 – 2017), los municipios de Murillo (Tolima) y Villamaría (Caldas) son los que mayor área glaciar presentan, a estos le siguen los municipios de Santa Isabel (Tolima) y Pereira (Risaralda) y en menor proporción el municipio de Santa rosa de Cabal (Risaralda). También se puede notar que, para el municipio de Santa Rosa de Cabal, para los años 2010, 2016 y 2017 el área glaciar es totalmente nula y para el municipio de Santa Isabel para el año 2017 tampoco se evidencia área glaciar. A esto se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 6.12 km<sup>2</sup> para Villamaría, 3.24 km<sup>2</sup> para Pereira, 0.76 km<sup>2</sup> para Santa Rosa de Cabal, 11.25 km<sup>2</sup> para Murillo y 4.77 km<sup>2</sup> para Santa Isabel.



**Figura 35:** Valores de área glaciar para el VNSI para los municipios de Villamaría, Pereira, Santa Rosa de Cabal, Murillo y Santa Isabel para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.1.4. VNR

El glaciar del VNR está en la jurisdicción de los municipios de Villamaria que pertenece al departamento de Caldas, Villahermosa, Murillo, Herveo y Casabianca que están en la jurisdicción del departamento del Tolima. En la tabla 17 se recopilarán los datos de área glaciar para cada uno de estos municipios para los años 1850, 1955, 1996, 2010, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciar Total por año (Km <sup>2</sup> )	Área Glaciar Municipio por año (Km <sup>2</sup> )	% de Área Glaciar con respecto al total por año	
VNR	Tolima	Casabianca	1850	50.22	8.46	16.85	
			1955	21.86	2.60	11.91	
			1996	16.52	1.81	10.93	
			2010	9.78	0.44	4.48	
			2016	9.04	0.30	3.36	
			2017	8.40	0.24	2.88	
		Herveo	1850	50.22	0.92	1.83	
			1955	21.86	0.01	0.07	
			1996	16.52	0.01	0.03	
			2010	9.78	0.00	0.00	
			2016	9.04	0.00	0.00	
			2017	8.40	0.00	0.00	
		Murillo	1850	50.22	17.45	34.74	
			1955	21.86	7.71	35.25	
			1996	16.52	5.71	34.55	
			2010	9.78	4.03	41.15	
			2016	9.04	3.75	41.55	
			2017	8.40	3.75	44.66	
		Villahermosa	1850	50.22	7.11	14.15	
			1955	21.86	3.24	14.83	
			1996	16.52	1.83	11.05	
			2010	9.78	1.23	12.58	
			2016	9.04	1.15	12.76	
			2017	8.40	1.08	12.85	
		Caldas	Villamaria	1850	50.22	16.29	32.43
				1955	21.86	8.30	37.96
				1996	16.52	7.18	43.43
				2010	9.78	4.17	42.58
				2016	9.04	3.75	41.46
				2017	8.40	3.33	39.61

**Tabla 16:** Área glaciar VNR para los municipios de Villamaria, Villahermosa, Murillo, Herveo y Casabianca para el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 36, se puede observar los valores anteriormente citados, se puede apreciar que para todos los años comprendidos (1850 – 2017), los municipios de Murillo (Tolima) y Villamaria (Caldas) son los que mayor área glaciar presentan, a estos le siguen los municipios de Villahermosa (Tolima) y Casabianca (Tolima) y en menor proporción el municipio de Herveo (Tolima). También se puede notar que, para el municipio de Herveo el área glaciar ha sido nula, solo presento área para el año 1850 (0.92 km<sup>2</sup>). A esto se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 12.96 km<sup>2</sup> para Villamaria, 6.03 km<sup>2</sup> para Villahermosa, 13.7 km<sup>2</sup> para Murillo, 0.92 km<sup>2</sup> para Herveo y 8.22 km<sup>2</sup> para Casabianca.

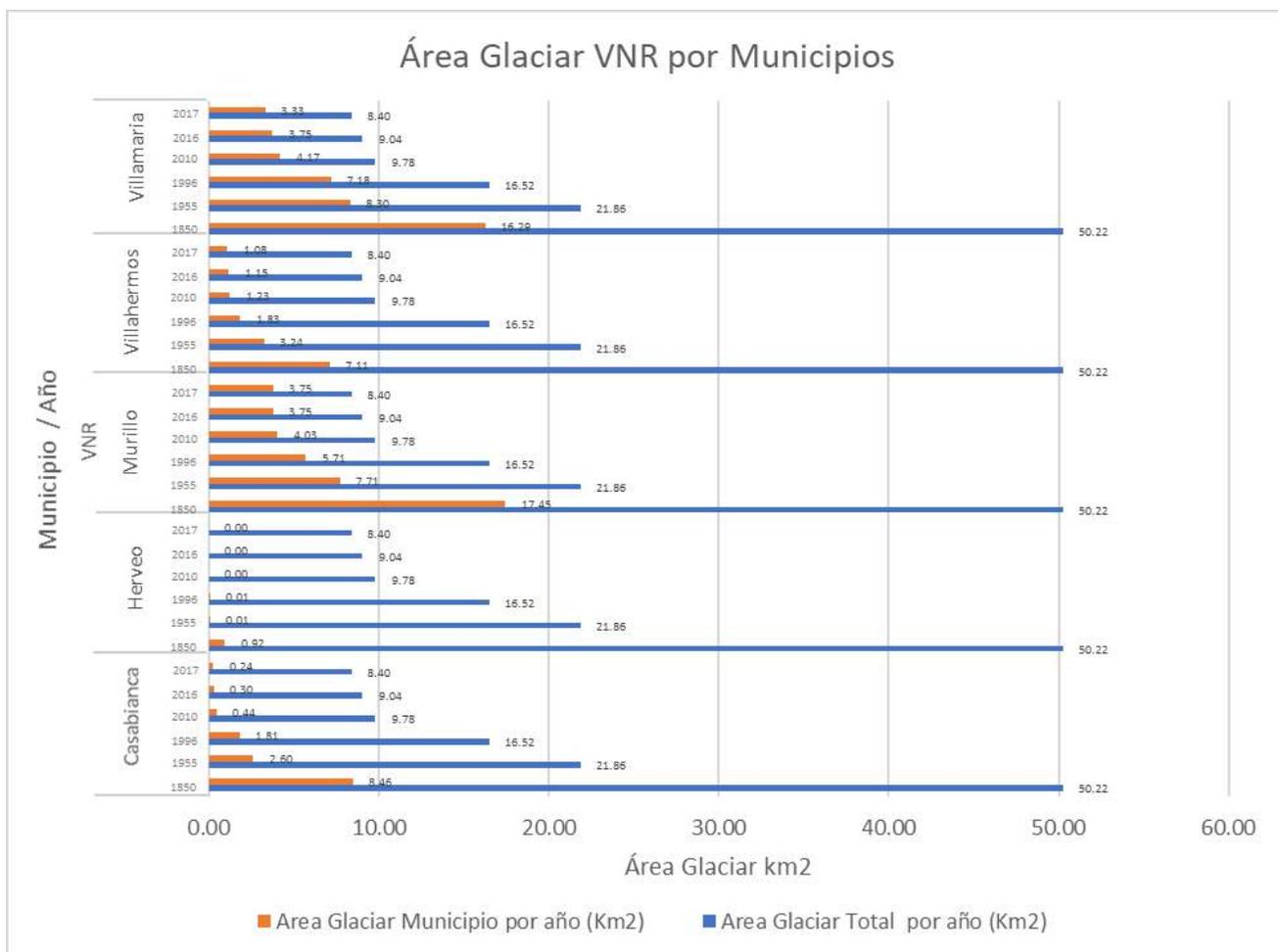


Figura 36: Valores de área glaciar para el VNR para los municipios de Villamaría, Villahermosa, Murillo, Herveo y Casabianca para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.1.5. SNCG

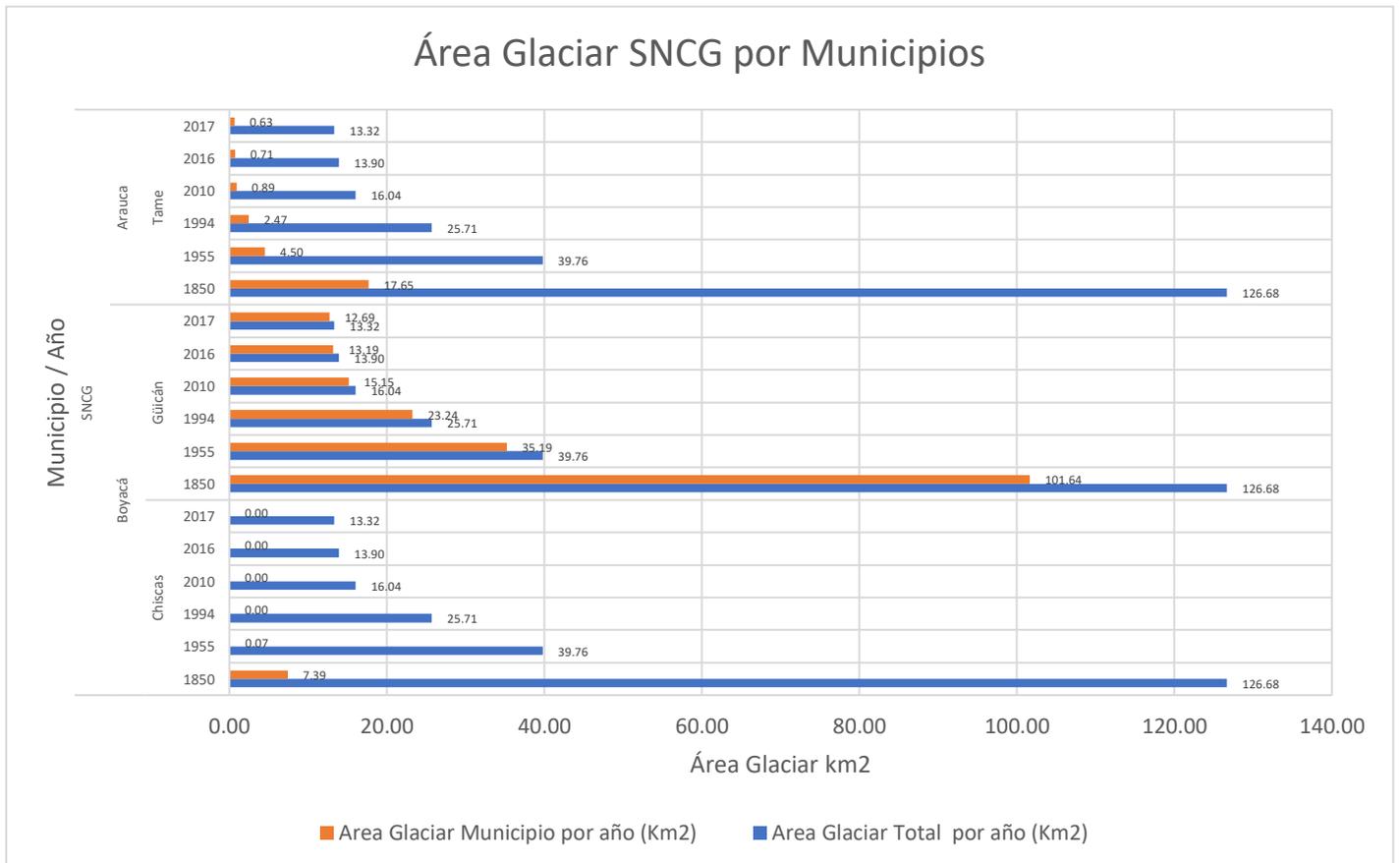
El glaciar de la SNCG se encuentra en la jurisdicción del municipio de Tame que pertenece al departamento de Arauca, y los municipios de Güicán y Chiscas que pertenecen al departamento de Boyacá. En la tabla 18 se recopilarán los datos de área glaciar para cada uno de estos municipios para los años 1850, 1955, 1994, 2010, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Municipio por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNCG	Boyacá	Chiscas	1850	126.68	7.39	5.83
			1955	39.76	0.07	0.17
			1994	25.71	0.00	0.00
			2010	16.04	0.00	0.00
			2016	13.90	0.00	0.00

			2017	13.32	0.00	0.00
			Güicán		1850	126.68
1955	39.76	35.19			88.51	
1994	25.71	23.24			90.40	
2010	16.04	15.15			94.44	
2016	13.90	13.19			94.92	
2017	13.32	12.69			95.27	
Arauca	Tame	1850	126.68	17.65	13.93	
		1955	39.76	4.50	11.32	
		1994	25.71	2.47	9.60	
		2010	16.04	0.89	5.56	
		2016	13.90	0.71	5.08	
		2017	13.32	0.63	4.73	

**Tabla 17:** Área glaciér SNCG para los municipios de Tame, Chiscas y Güicán para el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 37, se puede observar los valores anteriormente citados, se puede apreciar que para todos los años comprendidos (1850 – 2017), el municipio de Güicán (Boyacá) es el que presenta mayor área glaciér, a este le sigue el municipio de Tame (Arauca) y en menor proporción el municipio de Chiscas (Boyacá). También se puede notar que, para el municipio de Chiscas el área glaciér ha sido nula, presentando solo área glaciada para el año 1850 (7.39 km<sup>2</sup>). A esto se le puede asociar que el retroceso glaciér para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 88.95 km<sup>2</sup> para Güicán, 17.02 km<sup>2</sup> para Tame y 7.39 km<sup>2</sup> para Chiscas.



**Figura 37:** Valores de área glaciér para la SNCG para los municipios de Güicán, Tame y Chiscas para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.1.6. SNSM

El glaciar de la SNSM se encuentra en la jurisdicción del municipio de Valledupar que pertenece al departamento del Cesar, el municipio de Dibulla que pertenece al departamento de La Guajira y los municipios de Santa Marta, Ciénaga y Aracataca que pertenecen al departamento del Magdalena. En la tabla 19 se recopilarán los datos de área glaciar para cada uno de estos municipios para los años 1850, 1954, 1995, 2010, 2016 y 2017.

Glaciar	Departamento	Municipio	Año	Área Glaciar Total por año (Km <sup>2</sup> )	Área Glaciar Municipio por año (Km <sup>2</sup> )	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNSM	Magdalena	Aracataca	1850	85.31	38.05	44.61
			1954	21.28	11.90	55.91
			1995	12.56	6.85	54.56
			2010	7.48	4.80	64.11
			2016	7.10	4.11	57.87
		2017	6.66	3.89	58.42	
		Ciénaga	1850	85.31	0.16	0.19
			1954	21.28	0.00	0.00
			1995	12.56	0.00	0.00
			2010	7.48	0.00	0.00
			2016	7.10	0.00	0.00
		2017	6.66	0.00	0.00	
		Santa Marta	1850	85.31	23.84	27.95
			1954	21.28	5.41	25.44
			1995	12.56	3.18	25.32
	2010		7.48	1.51	20.20	
	2016		7.10	1.78	25.01	
	2017	6.66	1.67	25.04		
	La Guajira	Dibulla	1850	85.31	4.24	4.97
			1954	21.28	1.58	7.43
			1995	12.56	0.99	7.84
			2010	7.48	0.47	6.22
			2016	7.10	0.44	6.21
	2017	6.66	0.37	5.61		
	Cesar	Valledupar	1850	85.31	19.01	22.29
			1954	21.28	2.39	11.22
			1995	12.56	1.54	12.28
2010			7.48	0.71	9.48	
2016			7.10	0.77	10.90	
2017	6.66	0.73	10.93			

**Tabla 18:** Área glaciar de la SNSM para los municipios de Valledupar, Dibulla, Santa Marta, Ciénaga y Aracataca para el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 38, se puede observar los valores anteriormente citados, se puede apreciar que para todos los años comprendidos (1850 – 2017), el municipio de Aracataca (Magdalena) es el que presenta mayor área glaciar, seguido del municipio de Santa Marta (Magdalena), Valledupar (Cesar), Dibulla (La Guajira) y en menor proporción el municipio de Ciénaga (Magdalena). Se puede notar que, para el municipio de Ciénaga el área glaciar ha sido nula, presentando solo área glaciada para el año 1850 (0.16km<sup>2</sup>). A esto se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada municipio comprendido en el periodo 1850 – 2017 es de 34.16

km<sup>2</sup> para Aracataca, 22.17 km<sup>2</sup> para Santa Marta, 18.28 km<sup>2</sup> para Valledupar, 3.87 km<sup>2</sup> para Dibulla y 0.16 km<sup>2</sup> para Ciénaga.

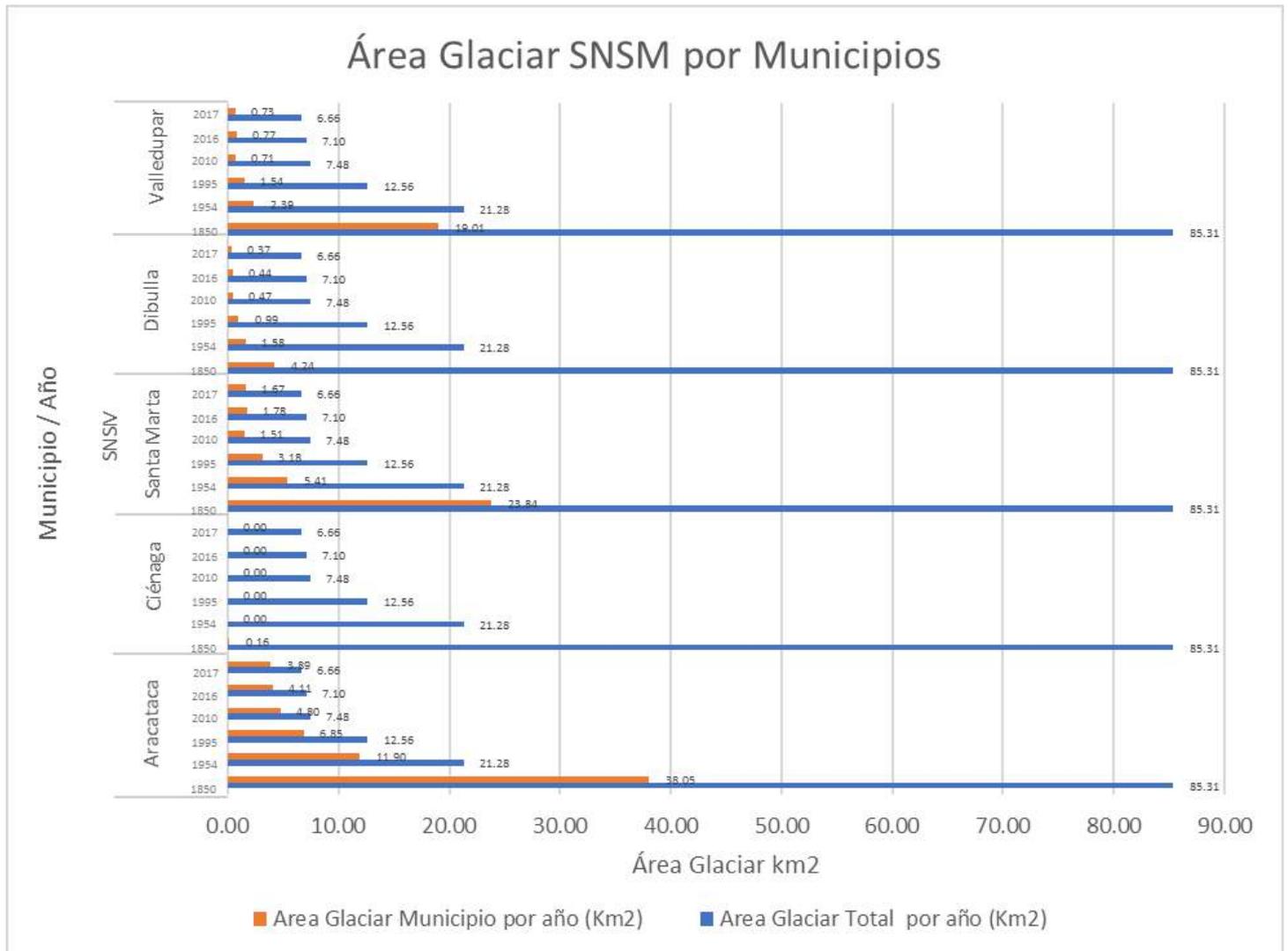


Figura 38: Valores de área glaciar para la SNSM para los municipios de Aracataca, Santa Marta, Valledupar, Dibulla y Ciénaga para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.2. Área Glaciar Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)

Al igual que en el apartado anterior, se mostrarán los resultados de comportamiento de área glaciar para las Corporaciones Autónomas Regionales o CAR, esto con el fin de analizar que corporaciones nacionales poseen en sus jurisdicciones superficies glaciares y determinar cómo se han comportado a través del tiempo.

Es de aclarar que dichas corporaciones en Colombia fueron creadas a partir de la Ley 99 de 1993 según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, los resultados y análisis que se mostraran a continuación para cada uno de los glaciares colombianos, se realizara a partir de la fecha de formación de dichas

corporaciones, esto quiere decir que se tomaran los resultados con fecha superior al año 1993.

### 6.2.2.1. VNH

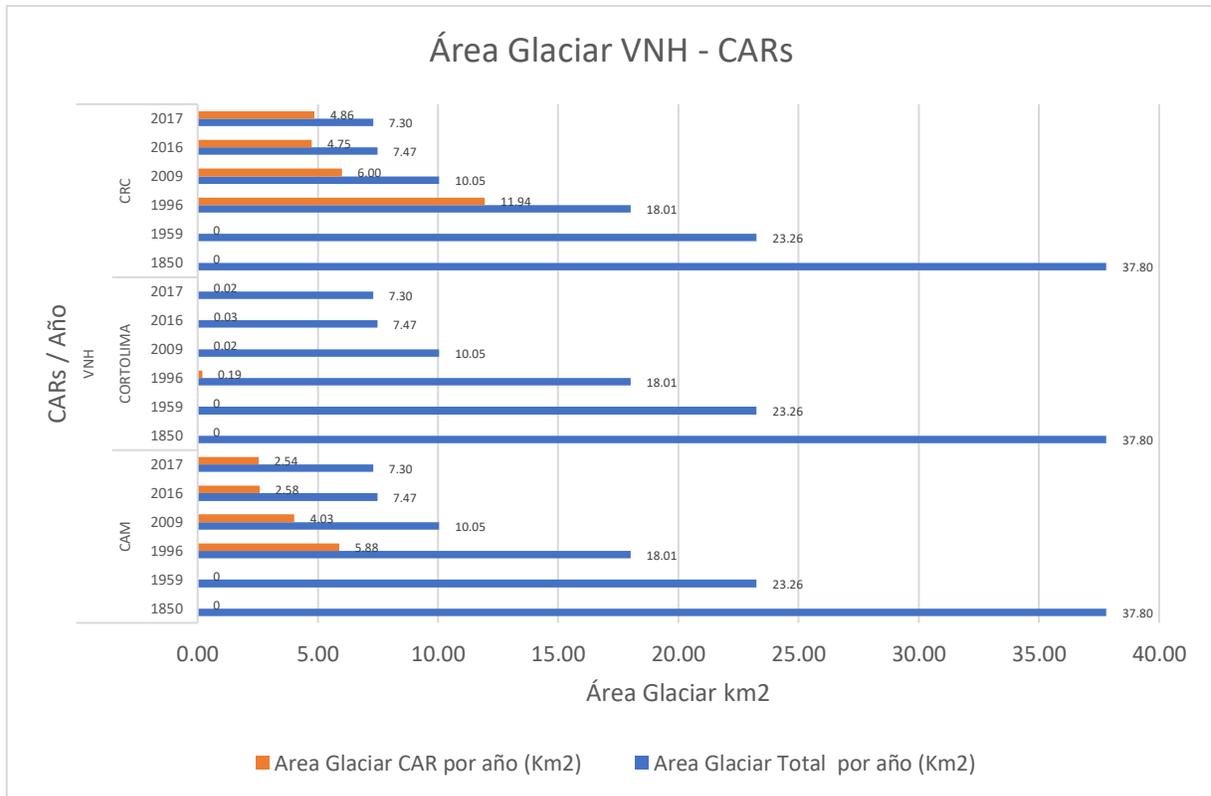
El glaciar del VNH se ubica en jurisdicción de tres corporaciones autónomas, las cuales son la CAM (CAR del Alto Magdalena), CORTOLIMA (CAR del Tolima) y CRC (CAR del Cauca). En la tabla 20 que se mostrara a continuación se observaran los valores de área glaciar para cada CAR comprendido entre el periodo 1996 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar CAR por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNH	CAM	1850	37.80	0	0
		1959	23.26	0	0
		1996	18.01	5.88	32.67
		2009	10.05	4.03	40.07
		2016	7.47	2.58	34.50
		2017	7.30	2.54	34.77
	CORTOLIMA	1850	37.80	0	0
		1959	23.26	0	0
		1996	18.01	0.19	1.04
		2009	10.05	0.02	0.18
		2016	7.47	0.03	0.39
		2017	7.30	0.02	0.21
	CRC	1850	37.80	0	0
		1959	23.26	0	0
		1996	18.01	11.94	66.30
		2009	10.05	6.00	59.75
		2016	7.47	4.75	63.51
		2017	7.30	4.86	66.65

**Aclaración:** De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.

**Tabla 19:** Área glaciar del VNT para CAM, CRC y CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017.

En la Figura 39, se detallará un poco más la evolución glaciar del VNH para las tres corporaciones para el periodo comprendido entre 1996 – 2017. Se observa que la CRC y la CAM presentan durante este periodo de tiempo áreas glaciares considerables por año, caso contrario pasa con CORTOLIMA que el área glaciar es considerablemente baja. A lo anterior se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada CAR comprendido en el periodo 1996 – 2017 es de 7.08 km<sup>2</sup> para la CRC, 3.34 km<sup>2</sup> para la CAM y 0.17 km<sup>2</sup> para CORTOLIMA.



**Figura 39:** Valores de área glaciar del VNH para CRC, CAM y CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017.

### 6.2.2.2. VNT

El glaciar del VNT se ubica en jurisdicción de una sola corporación autónoma, la cual es CORTOLIMA (CAR del Tolima). En la tabla 21, que se mostrara a continuación, se observaran los valores de área glaciar para CORTOLIMA, comprendido entre el periodo 1996 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar CAR por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNT	CORTOLIMA	1850	8.57	0	0
		1955	3.03	0	0
		1996	1.70	1.70	100.00
		2010	0.75	0.75	100.00
		2016	0.63	0.63	100.00
		2017	0.58	0.58	100.00

**Aclaración:** De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.

**Tabla 20:** Área glaciar del VNT para CORTOLIMA en el periodo 1996 - 2017.

En la Figura 40, se detallará un poco más la evolución glaciaria del VNT para el periodo comprendido entre los años 1996 - 2017. Se observa que el VNT solo esta en la jurisdicción de CORTOLIMA, por lo tanto, el retroceso glaciario en esta corporación es de 1.12 km<sup>2</sup> entre los años 1996 – 2017.

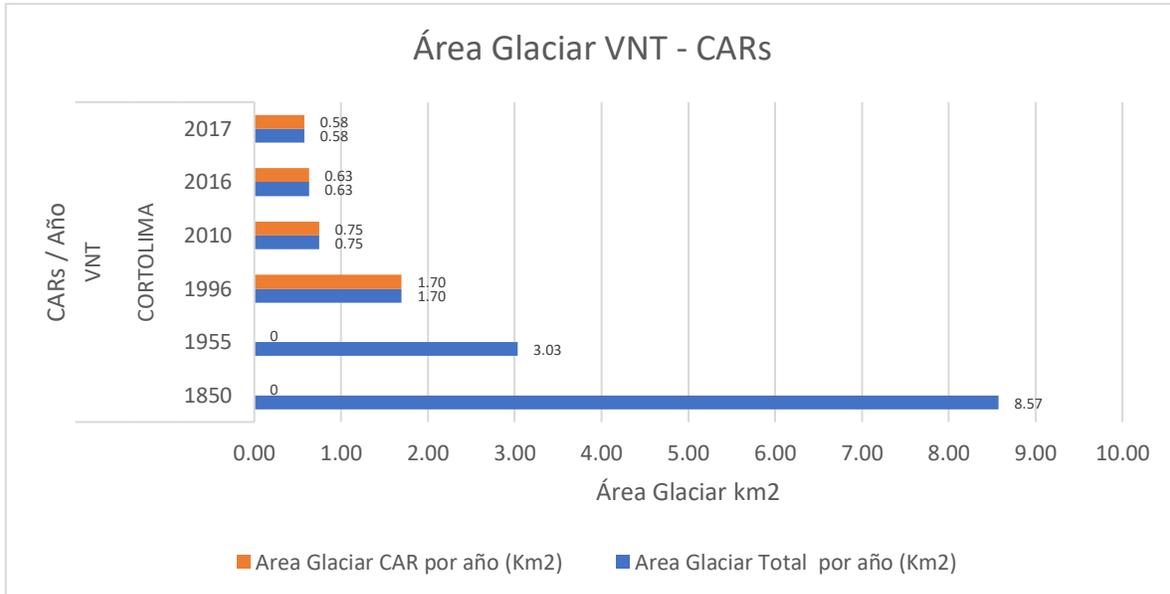


Figura 40: Valores de área glaciaria del VNT para CORTOLIMA para el periodo 1996 - 2017.

### 6.2.2.3. VNSI

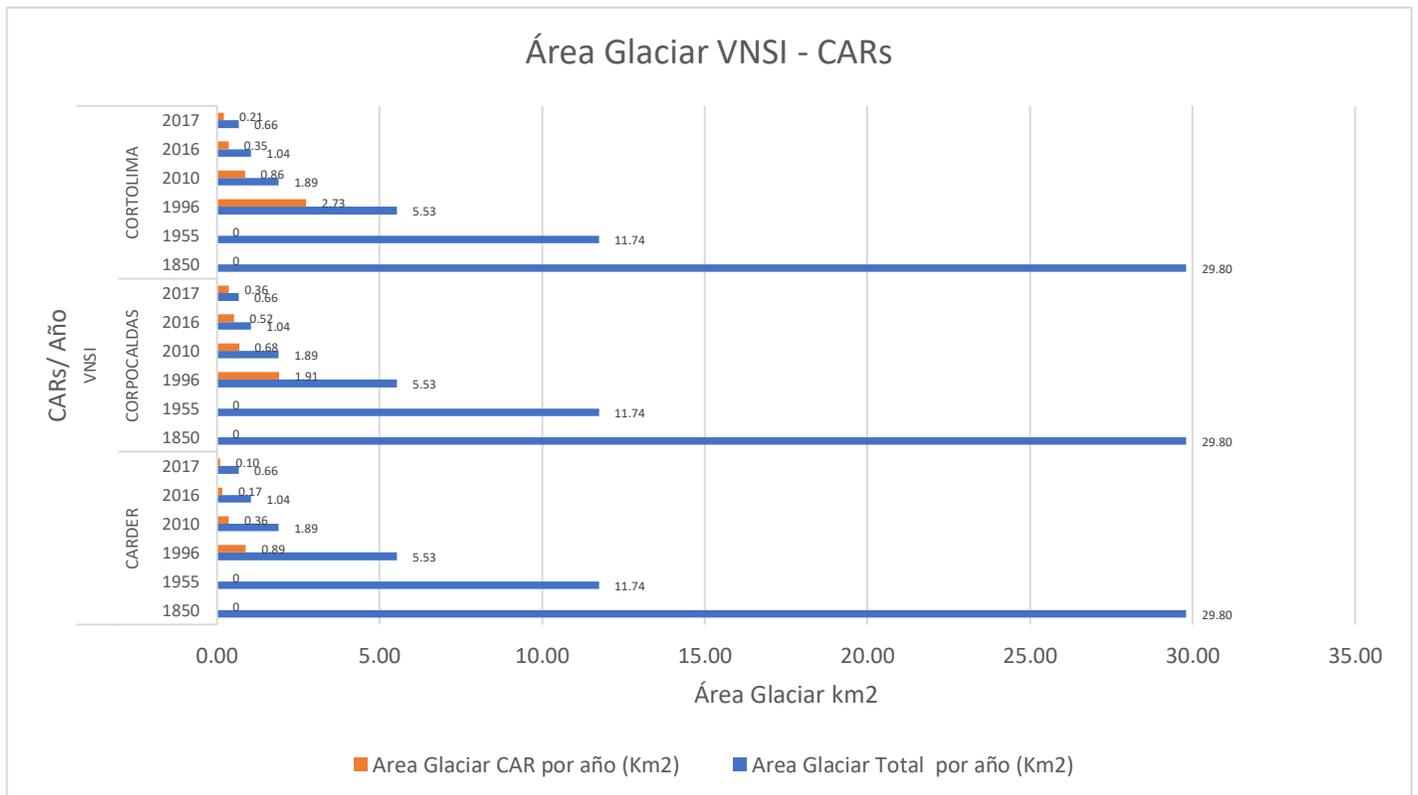
El glaciar del VNSI se ubica en jurisdicción de tres corporaciones autónomas, las cuales son CORTOLIMA (CAR del Tolima), CORPOCALDAS (CAR de Caldas) y CARDER (CAR de Risaralda). En la tabla 22, que se mostrara a continuación, se observaran los valores de área glaciaria para las tres corporaciones antes citadas, comprendido entre el periodo 1996 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciaria Total por año (Km2)	Área Glaciaria CAR por año (Km2)	% de Área Glaciaria con respecto al total por año
VNSI	CARDER	1850	29.80	0	0
		1955	11.74	0	0
		1996	5.53	0.89	16.01
		2010	1.89	0.36	19.03
		2016	1.04	0.17	16.24
		2017	0.66	0.10	14.37
	CORPOCALDAS	1850	29.80	0	0
		1955	11.74	0	0
		1996	5.53	1.91	34.53
		2010	1.89	0.68	35.75
		2016	1.04	0.52	50.10

		2017	0.66	0.36	54.49
	CORTOLIMA	1850	29.80	0	0
		1955	11.74	0	0
		1996	5.53	2.73	49.46
		2010	1.89	0.86	45.22
		2016	1.04	0.35	33.65
		2017	0.66	0.21	31.14
<p><b>Aclaración:</b> De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.</p>					

**Tabla 21:** Área glaciar del VNSI para CORTOLIMA, CORPOCALDAS y CARDER en el periodo 1996 - 2017.

En la Figura 41, se detallará un poco más la evolución glaciar del VNSI para las tres corporaciones en el periodo comprendido entre 1996 – 2017. Se observa que CORPOCALDAS Y CORTOLIMA presentan durante este periodo de tiempo áreas glaciares considerables por año, caso contrario pasa con CARDER que el área glaciar es considerablemente baja. A lo anterior se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada CAR comprendido en el periodo 1996 – 2017 es de 1.55 km<sup>2</sup> para CORPOCALDAS, 2.52 km<sup>2</sup> para CORTOLIMA y 0.79 km<sup>2</sup> para CARDER.



**Figura 41:** Valores de área glaciar del VNSI para CORTOLIMA, CORPOCALDAS y CARDER para el periodo 1996 - 2017.

### 6.2.2.4. VNR

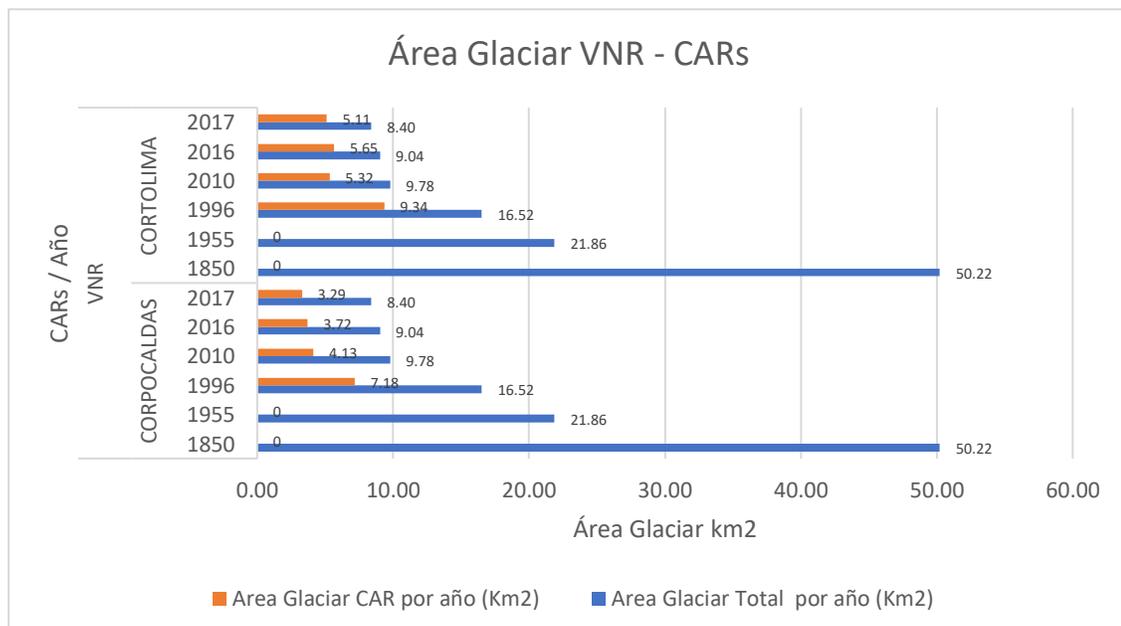
El glaciar del VNR se encuentra en jurisdicción de dos CAR las cuales son CORPOCALDAS y CORTOLIMA. En la tabla 23 se observa los valores de área glaciar para las dos corporaciones antes citadas, comprendido entre el periodo 1996 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciar Total por año (Km <sup>2</sup> )	Área Glaciar CAR por año (Km <sup>2</sup> )	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNR	CORPOCALDAS	1850	50.22	0	0
		1955	21.86	0	0
		1996	16.52	7.18	43.46
		2010	9.78	4.13	42.21
		2016	9.04	3.72	41.12
		2017	8.40	3.29	39.15
	CORTOLIMA	1850	50.22	0	0
		1955	21.86	0	0
		1996	16.52	9.34	56.54
		2010	9.78	5.32	54.38
		2016	9.04	5.65	62.56
		2017	8.40	5.11	60.85

**Aclaración:** De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.

**Tabla 22:** Área glaciar del VNR para CORTOLIMA y CORPOCALDAS en el periodo 1996 - 2017.

En la Figura 42, se detallará un poco más la evolución glaciar del VNR para las dos corporaciones en el periodo comprendido entre 1996 – 2017. Se observa que CORTOLIMA presenta durante este periodo de tiempo un área glaciar mayor por año con respecto a CORPOCALDAS. A lo anterior se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada CAR comprendido en el periodo 1996 – 2017 es de 4.23 km<sup>2</sup> para CORTOLIMA y 3.89 km<sup>2</sup> para CORPOCALDAS.



**Figura 42:** Valores de área glaciar del VNR para CORTOLIMA y CORPOCALDAS para el periodo 1996 - 2017.

### 6.2.2.5. SNCG

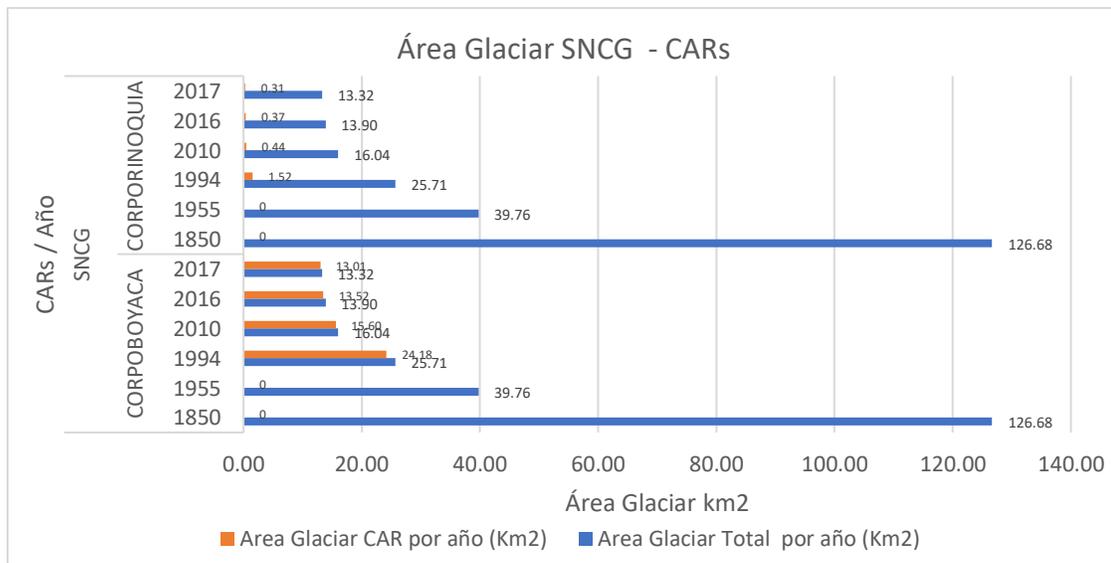
El glaciar de la SNCG se encuentra en jurisdicción de dos CAR las cuales son CORPOBOYACA y CORPORINOQUIA. En la tabla 24 se observa los valores de área glaciar para las dos corporaciones antes citadas, comprendido entre el periodo 1994 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar CAR por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNCG	CORPOBOYACA	1850	126.68	0	0
		1955	39.76	0	0
		1994	25.71	24.18	94.07
		2010	16.04	15.60	97.26
		2016	13.90	13.52	97.31
		2017	13.32	13.01	97.67
	CORPORINOQUIA	1850	126.68	0	0
		1955	39.76	0	0
		1994	25.71	1.52	5.93
		2010	16.04	0.44	2.74
		2016	13.90	0.37	2.69
		2017	13.32	0.31	2.33

**Aclaración:** De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.

**Tabla 23:** Área glaciar de la SNCG para CORPOBOYACA y CORPORINOQUIA en el periodo 1994 - 2017.

En la Figura 43, se detallará un poco más la evolución glaciar de la SNCG para las dos corporaciones en el periodo comprendido entre 1994 – 2017. Se observa que CORPOBOYACA presenta durante este periodo de tiempo un área glaciar mucho mayor por año con respecto a CORPORINOQUIA. A lo anterior se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada CAR comprendido en el periodo 1994 – 2017 es de 11.17 km<sup>2</sup> para CORPOBOYACA y 0.21 km<sup>2</sup> para CORPORINOQUIA.



**Figura 43:** Valores de área glaciar de la SNCG para CORPOBOYACA y CORPORINOQUIA para el periodo 1994 - 2017.

### 6.2.2.6. SNSM

El glaciar de la SNSM se ubica en jurisdicción de tres corporaciones autónomas, las cuales son CORPAMAG, CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR. En la tabla 25, que se mostrara a continuación, se observan los valores de área glaciar para las tres corporaciones antes citadas, comprendido entre el periodo 1995 – 2017.

Glaciar	Corporación Autónoma Regional (CAR)	Año	Área Glaciar Total por año (Km <sup>2</sup> )	Área Glaciar CAR por año (Km <sup>2</sup> )	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNSM	CORPAMAG	1850	85.31	0	0
		1954	21.28	0	0
		1995	12.56	11.15	88.73
		2010	7.48	7.09	94.77
		2016	7.10	6.63	93.36
		2017	6.66	6.29	94.51
	CORPOCESAR	1850	85.31	0	0
		1954	21.28	0	0
		1995	12.56	0.79	6.30
		2010	7.48	0.13	1.76
		2016	7.10	0.23	3.25
		2017	6.66	0.16	2.35
	CORPOGÜAJIRA	1850	85.31	0	0
		1954	21.28	0	0
		1995	12.56	0.62	4.97
		2010	7.48	0.26	3.47
		2016	7.10	0.24	3.39
		2017	6.66	0.21	3.14
<p><b>Aclaración:</b> De acuerdo a la Ley 99 del 1993, a partir de este año, se forman las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia según el Ministerio de Ambiente, por lo tanto, antes de este año no se realiza ninguna comparativa de área glaciar para cada CAR.</p>					

**Tabla 24:** Área glaciar de la SNSM para CORPAMAG, CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR en el periodo 1995 - 2017.

En la Figura 44, se detallará un poco más la evolución glaciar de la SNSM para las tres corporaciones para el periodo comprendido entre 1995 – 2017. Se puede observar que CORPAMAG presenta la mayor cantidad de área glaciar por año con respecto a CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR donde las áreas son considerablemente bajas. A lo anterior se le puede asociar que el retroceso glaciar para cada CAR comprendido en el periodo 1995 – 2017 es de 4.86 km<sup>2</sup> para CORPAMAG, 0.41 km<sup>2</sup> para CORPOGÜAJIRA y 0.63 km<sup>2</sup> para CORPOCESAR.

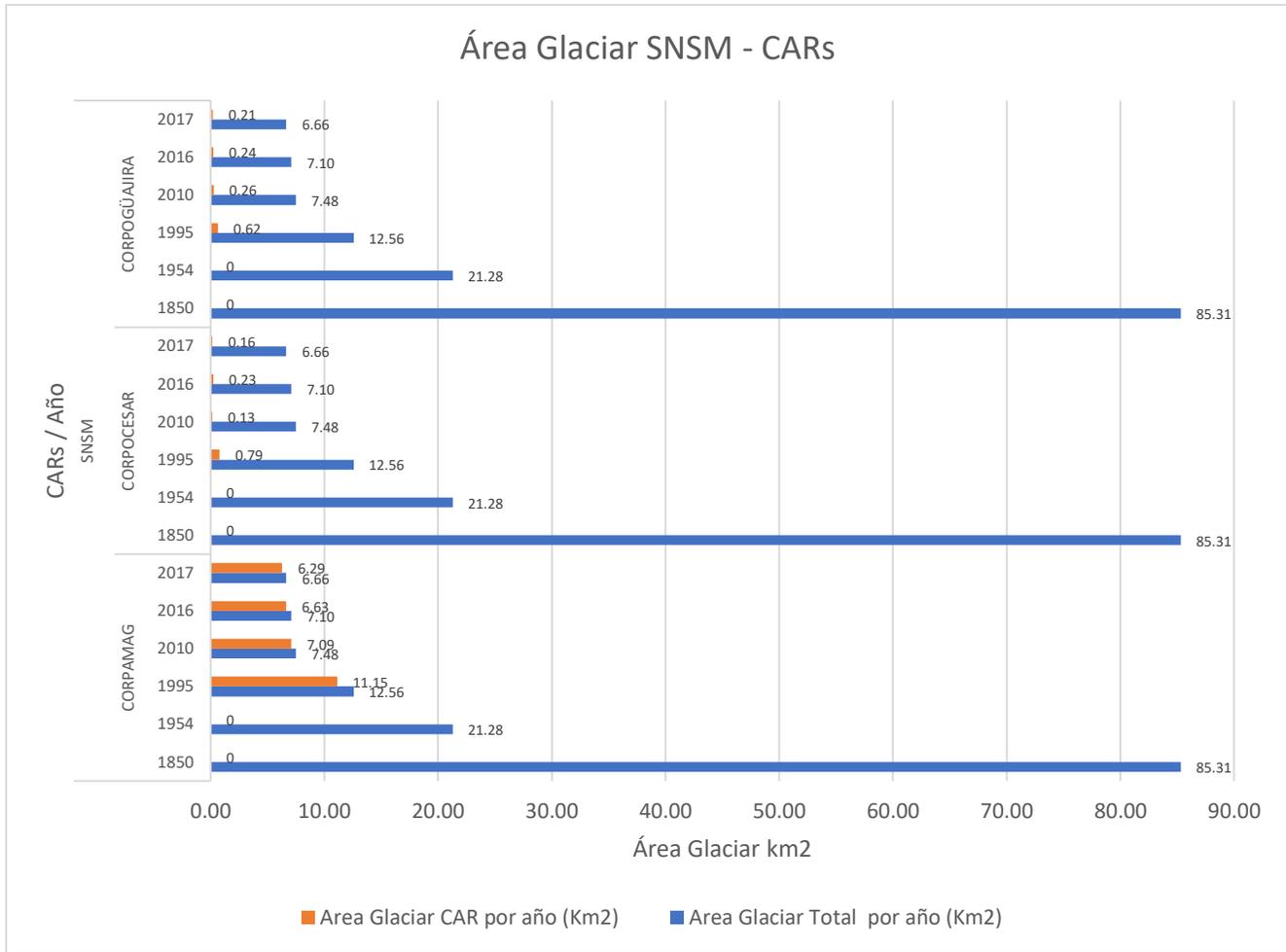


Figura 44: Valores de área glaciar de la SNSM para CORPAMAG, CORPOGÜAJIRA y CORPOCESAR para el periodo 1995 - 2017.

### 6.2.3. Área Glaciar Parques Nacionales Naturales (PNN)

En la actualidad Colombia posee 60 PNN, los cuales están divididos por regiones. Como es bien sabido estas superficies glaciares se encuentran protegidas por estas jurisdicciones, donde solo cuatro PNN poseen área glaciar. Dos de estos PNN se encuentran en la Región Andes Occidentales (PNN Nevado del Huila y PNN Los Nevados), uno en la Región Andes Nororientales (PNN el Cocuy) y por último uno en la Región Caribe (PNN Sierra Nevada de Santa Marta).

El glaciar VNH se encuentra en la jurisdicción del PNN Nevado del Huila, los glaciares VNT, VNSI y VNR se ubican en el PNN Los Nevados, el glaciar de la SNCG se encuentra ubicado en el PNN el Cocuy y el glaciar de la SNSM se encuentra en el PNN Sierra Nevada de Santa Marta.

En la tabla 26 se observan los valores de área glaciar por año para cada PNN.

<b>Área Glaciar VNH por año (km<sup>2</sup>)</b>						
<b>PNN Nevado del Huila</b>	<b>1850</b>	<b>1959</b>	<b>1996</b>	<b>2009</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
VNH	0	0	18.01	10.05	7.47	7.30
<b>Aclaración:</b> El año de creación de este PNN es 1977, por lo tanto, no se hace una comparativa del área glaciar para los años 1850 y 1959.						
<b>Área Glaciar VNT, VNSI y VNR por año (km<sup>2</sup>)</b>						
<b>PNN Los Nevados</b>	<b>1850</b>	<b>1955</b>	<b>1996</b>	<b>2010</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
VNT	0	0	1.70	0.75	0.63	0.58
VNSI	0	0	5.53	1.89	1.04	0.66
VNR	0	0	16.52	9.78	9.04	8.40
Total	0.00	0.00	23.75	12.42	10.71	9.64
<b>Aclaración:</b> El año de creación de este PNN es 1974, por lo tanto, no se hace una comparativa del área glaciar para los años 1850 y 1955.						
<b>Área Glaciar SNCG por año (km<sup>2</sup>)</b>						
<b>PNN el Cocuy</b>	<b>1850</b>	<b>1955</b>	<b>1994</b>	<b>2010</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
SNCG	0	0	25.71	16.04	13.9	13.32
<b>Aclaración:</b> El año de creación de este PNN es 1977, por lo tanto, no se hace una comparativa del área glaciar para los años 1850 y 1955.						
<b>Área Glaciar SNSM por año (km<sup>2</sup>)</b>						
<b>PNN Sierra Nevada de Santa Marta</b>	<b>1850</b>	<b>1954</b>	<b>1995</b>	<b>2010</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
SNSM	0	0	12.56	7.48	7.1	6.66
<b>Aclaración:</b> El año de creación de este PNN es 1964, por lo tanto, no se hace una comparativa del área glaciar para los años 1850 y 1954.						

**Tabla 25:** Valores de área glaciar para cada PNN por año.

A partir de la información anterior, se observa que para todos los años registrados el PNN el Cocuy es el que presenta mayor área glaciar seguido de PNN Los Nevados, PNN Nevado del Huila y PNN Sierra Nevada de Santa Marta, también se puede observar que para el periodo comprendido entre 1996 – 2017, el PNN Sierra Nevada de Santa Marta es el que ha presentado un valor de retroceso glaciar más bajo de 5.9 km<sup>2</sup>, le sigue el PNN Nevado del Huila con un retroceso de 10.71 km<sup>2</sup>, el PNN el Cocuy con un retroceso glaciar de 12.39 km<sup>2</sup> y el PNN Los Nevados con un retroceso de 14.11 km<sup>2</sup> el mayor registrado para todos los PNN, esto posiblemente se debe a la gran influencia de la actividad volcánica que se genera en esta zona y también por las particularidades de uno de sus glaciares como el Santa Isabel, el cual es el glaciar más bajo de los seis registrados en Colombia, lo que lo hace posiblemente el más susceptible en cuanto a cambios climáticos.

## 6.2.4. Área Glaciar Subzonas Hidrográficas (Cuencas)

Los glaciares colombianos juegan un papel muy importante en la parte hidrológica del país, ya que son las principales fuentes de abastecimiento de muchos de los afluentes cercanos a estas superficies, por lo que se hace necesario determinar cómo ha sido la evolución multitemporal de estos glaciares para las principales cuencas hidrográficas a los que pertenecen.

### 6.2.4.1. VNH

El glaciar del VNH principalmente se encuentra al interior de la cuenca del Río Páez, por lo que esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de esta cuenca, en la tabla 27 se puede observar los datos de área para este glaciar por año.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Cuenca por año (Km <sup>2</sup> )
VNH	Río Páez	1850	37.80
		1959	23.26
		1996	18.01
		2009	10.05
		2016	7.47
		2017	7.30

**Tabla 26:** Datos de área glaciar del VNH para la cuenca del Río Páez comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 45, se puede detallar mucho mejor el área glaciar por año del VNH para la cuenca del Río Páez, se puede observar que el retroceso glaciar es de 30.5 km<sup>2</sup> para el periodo 1850 – 2017.



**Figura 45:** Área glaciar del VNH para la cuenca del Río Páez para el periodo 1850 - 2017.

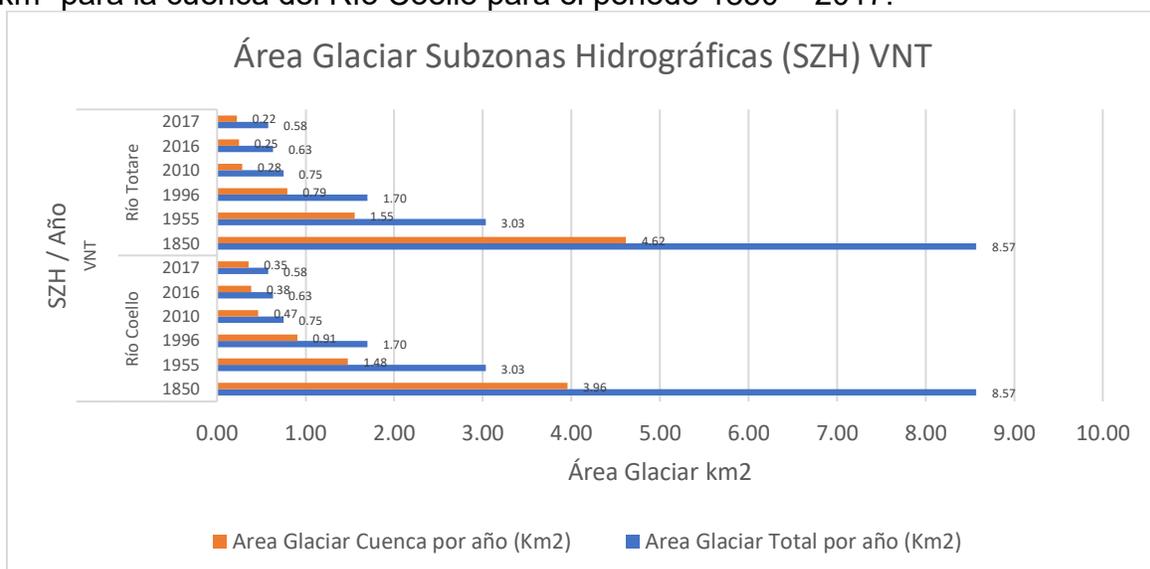
### 6.2.4.2. VNT

El glaciar del VNT presenta principalmente área glaciar para las cuencas del Río Coello y Río Totare, por lo que esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas dos cuencas hidrográficas, en la tabla 28 se puede observar los datos de área para este glaciar por año.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Cuenca por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNT	Río Coello	1850	8.57	3.96	46.14
		1955	3.03	1.48	48.75
		1996	1.70	0.91	53.37
		2010	0.75	0.47	62.34
		2016	0.63	0.38	60.74
		2017	0.58	0.35	61.29
	Río Totare	1850	8.57	4.62	53.86
		1955	3.03	1.55	51.25
		1996	1.70	0.79	46.63
		2010	0.75	0.28	37.66
		2016	0.63	0.25	39.26
		2017	0.58	0.22	38.71

**Tabla 27:** Datos de área glaciar del VNT para las cuencas del Río Coello y el Río Totare comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 46, se puede observar que el área glaciar tanto para la cuenca del Río Totare y la cuenca del Río Coello es casi similar, donde el retroceso glaciar es un poco mayor para la cuenca del Río Totare aproximadamente 4.4 km<sup>2</sup> y 3.61 km<sup>2</sup> para la cuenca del Río Coello para el periodo 1850 – 2017.



**Figura 46:** Comparación área glaciar del VNT por año para las cuencas del Río Totare y Río Coello para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.4.3. VNSI

El glaciar del VNSI presenta principalmente área glaciar para las cuencas del Río Chinchiná, Río Lagunilla y otros directos al Magdalena, Río Otún y otros directos al Cauca y Río Totare, por lo que esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas cuatro cuencas hidrográficas, en la tabla 29 se puede observar los datos de área para el periodo 1850 – 2017.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Cuenca por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNSI	Río Chinchiná	1850	29.80	7.65	25.66
		1955	11.74	2.82	24.05
		1996	5.53	1.59	28.82
		2010	1.89	0.68	35.79
		2016	1.04	0.53	50.65
		2017	0.66	0.38	56.66
	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	1850	29.80	12.02	40.34
		1955	11.74	4.33	36.88
		1996	5.53	2.09	37.84
		2010	1.89	0.65	34.44
		2016	1.04	0.26	25.47
		2017	0.66	0.18	26.45
	Río Otún y otros directos al Cauca	1850	29.80	6.12	20.53
		1955	11.74	3.02	25.72
		1996	5.53	1.29	23.29
		2010	1.89	0.44	23.41
		2016	1.04	0.21	20.35
		2017	0.66	0.11	16.89
	Río Totare	1850	29.80	4.02	13.47
		1955	11.74	1.57	13.35
		1996	5.53	0.56	10.06
		2010	1.89	0.12	6.37
		2016	1.04	0.04	3.53
		2017	0.66	0	0.00

**Tabla 28:** Datos de área glaciar del VNSI para las cuencas del Río Chinchiná, Río Lagunilla y otros directos al Magdalena, Río Otún y otros directos al Cauca y el Río Totare comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 47, se puede observar que la cuenca que presenta mayor área glaciar en la actualidad (año 2017) es la cuenca del Río Chinchiná con 0.38 km<sup>2</sup>, seguida de la cuenca del Río Lagunilla con 0.18 km<sup>2</sup>, cuenca del Río Otún con 0.11 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Totare para el año 2017 ya no presenta área glaciar. Asociado a lo anterior, la cuenca que presenta el mayor retroceso glaciar es la del Río Lagunilla con 11.84 km<sup>2</sup>, seguido de la cuenca del Río Chinchiná con 7.27 km<sup>2</sup>,

cuenca del Río Otún con 6.01 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Totare con 4.02 km<sup>2</sup> para el periodo 1850 – 2017.

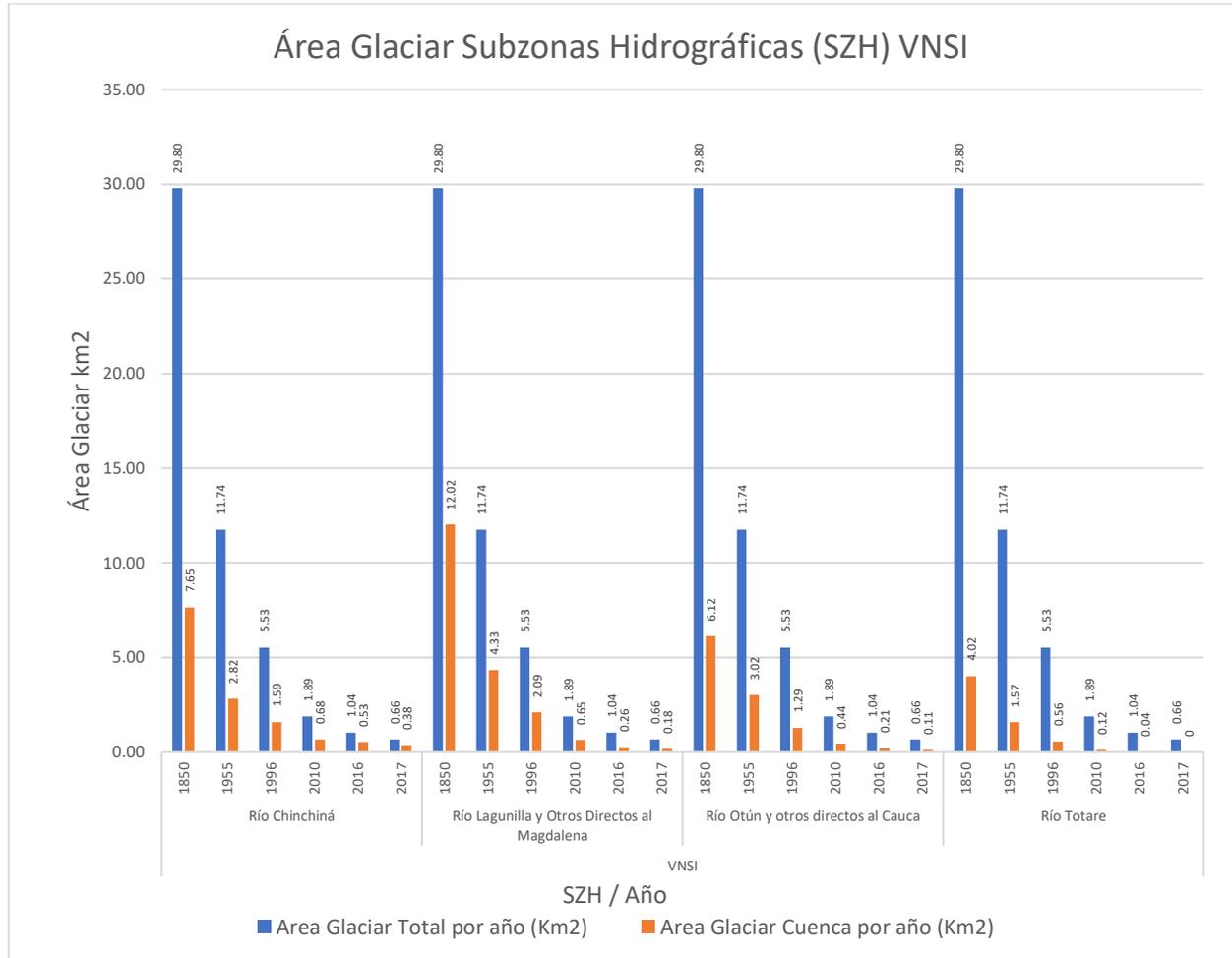


Figura 47: Comparación área glaciar del VNSI por año para las cuencas del Río Chinchiná, Río Lagunilla, Río Otún y Río Totare para el periodo 1850 - 2017.

#### 6.2.4.4. VNR

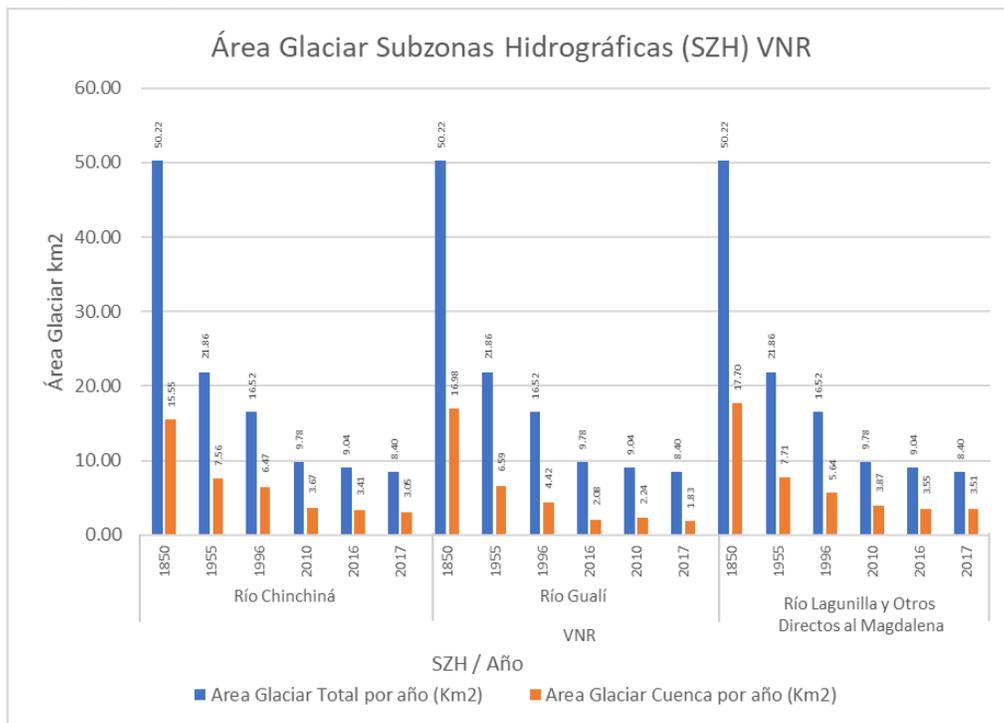
El glaciar del VNR presenta principalmente área glaciar para las cuencas del Río Chinchiná, Río Gualí y Río Lagunilla, para lo cual esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas tres cuencas hidrográficas, en la tabla 30 se puede observar los datos de área para el periodo 1850 – 2017.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Cuenca por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
VNR	Río Chinchiná	1850	50.22	15.55	30.95
		1955	21.86	7.56	34.58
		1996	16.52	6.47	39.14

		2010	9.78	3.67	37.53
		2016	9.04	3.41	37.69
		2017	8.40	3.05	36.34
	Río Gualí	1850	50.22	16.98	33.80
		1955	21.86	6.59	30.15
		1996	16.52	4.42	26.73
		2016	9.78	2.08	21.29
		2010	9.04	2.24	24.79
	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	2017	8.40	1.83	21.83
		1850	50.22	17.70	35.24
		1955	21.86	7.71	35.28
		1996	16.52	5.64	34.12
		2010	9.78	3.87	39.57
		2016	9.04	3.55	39.26
		2017	8.40	3.51	41.82

**Tabla 29:** Datos de área glaciar del VNR para las cuencas del Río Chinchiná, Río Gualí y Río Lagunilla comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 48, se puede observar que la cuenca que presenta mayor área glaciar para el año 2017 es la cuenca del Río Lagunilla con 3.51 km<sup>2</sup>, seguida de la cuenca del Río Chinchiná con 3.05 km<sup>2</sup> y la cuenca del Río Gualí con 1.83 km<sup>2</sup>. Asociado a lo anterior, la cuenca que presenta el mayor retroceso glaciar es la cuenca del Río Gualí con 15.15 km<sup>2</sup>, seguido de la cuenca del Río Lagunilla con 14.2 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Chinchiná con 12.5 km<sup>2</sup>, esto para el periodo 1850 – 2017.



**Figura 48:** Comparación área glaciar del VNR por año para las cuencas del Río Chinchiná, Río Gualí y Río Lagunilla para el periodo 1850 - 2017.

### 6.2.4.5. SNCG

El glaciar de la SNCG presenta principalmente área glaciar para las cuencas del Río Bojabá, Río Casanare, Río Chicamocha y Río Cobugón – Río Cobaría, para la cual esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas cuencas hidrográficas, en la tabla 31 se puede observar los datos de área para el periodo 1850 – 2017.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Total por año (Km2)	Área Glaciar Cuenca por año (Km2)	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNCG	Río Bojabá	1850	126.68	49.64	39.18
		1955	39.76	10.18	25.59
		1994	25.71	5.68	22.11
		2010	16.04	3.48	21.66
		2016	13.90	3.00	21.62
		2017	13.32	2.73	20.50
	Río Casanare	1850	126.68	20.37	16.08
		1955	39.76	5.89	14.82
		1994	25.71	3.78	14.71
		2010	16.04	1.75	10.88
		2016	13.90	1.52	10.94
		2017	13.32	1.45	10.86
	Río Chicamocha	1850	126.68	44.74	35.32
		1955	39.76	23.40	58.85
		1994	25.71	3.78	14.71
		2010	16.04	10.82	67.45
		2016	13.90	9.37	67.44
		2017	13.32	9.15	68.64
	Río Cobugón - Río Cobaría	1850	126.68	11.93	9.42
		1955	39.76	0.29	0.74
		1994	25.71	0	0.00
		2010	16.04	0	0.00
		2016	13.90	0	0.00
		2017	13.32	0	0.00

**Tabla 30:** Datos de área glaciar de la SNCG para las cuencas del Río Bojabá, Río Casanare, Río Chicamocha y Río Cobugón - Río Cobaría comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 49, se puede observar que la cuenca que presenta mayor área glaciar para el año 2017 es la cuenca del Río Chicamocha con 9.15 km<sup>2</sup>, seguida de la cuenca del Río Bojabá con 2.73 km<sup>2</sup>, la cuenca del Río Casanare con 1.45 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Cobugón – Río Cobaría que para el año 2017 no presenta área glaciar, solo para el año 1850 y 1955 presentaba un área de 11.93 km<sup>2</sup> y 0.29 km<sup>2</sup> respectivamente. Asociado a lo anterior, la cuenca que presenta el mayor retroceso glaciar es la cuenca del Río Bojabá con 46.91 km<sup>2</sup>, seguido de la cuenca del Río Chicamocha con 35.59 km<sup>2</sup>, la cuenca del Río Casanare con 18.92

km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Cobugón – Río Cobaría con 11.93 km<sup>2</sup>, donde esta última cuenca para la actualidad ya no presenta área glaciár alguna, todos estos datos de área glaciár están comprendidos para el periodo 1850 – 2017.

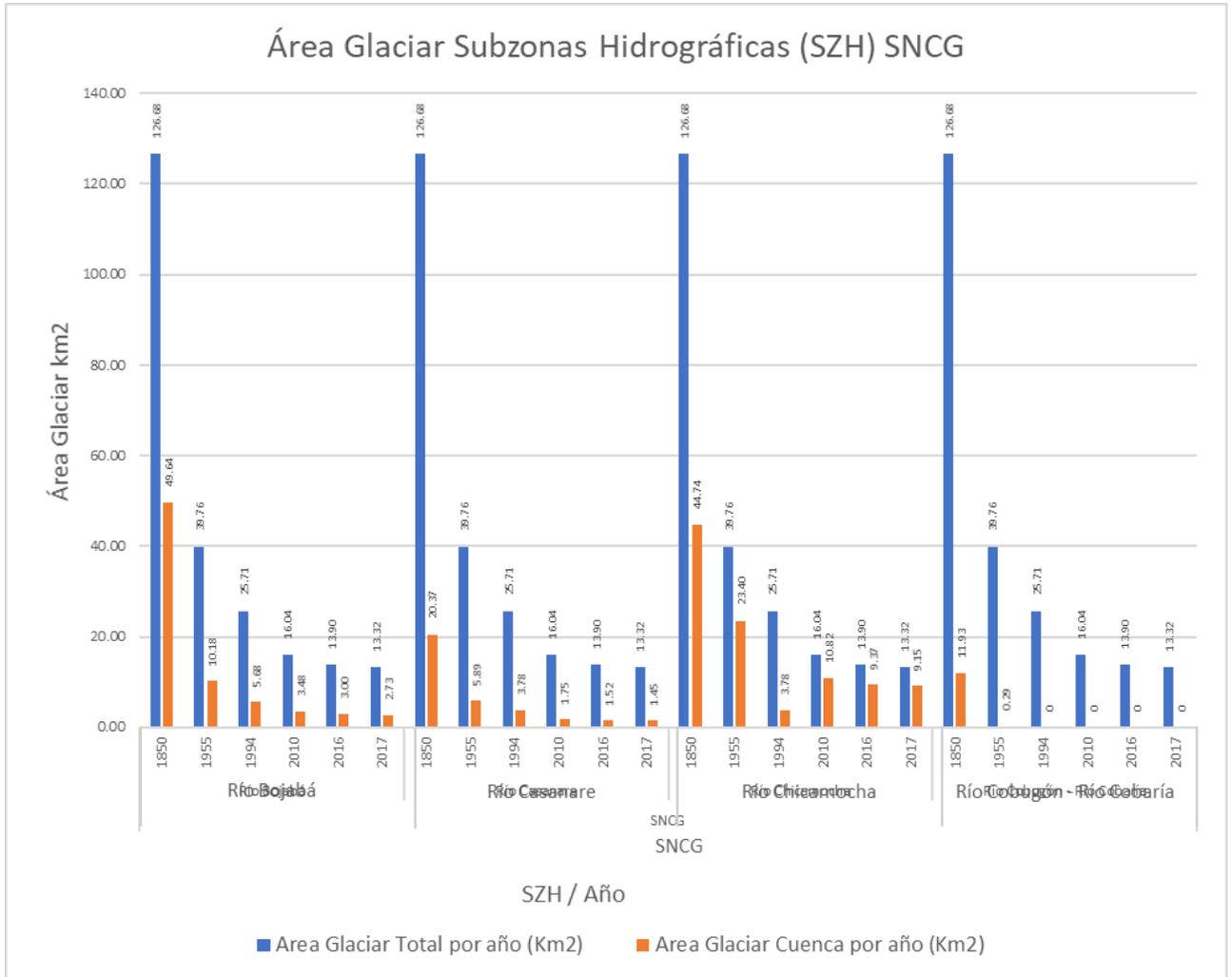


Figura 49: Comparación área glaciár de la SNCG por año para las cuencas del Río Bojabá, Río Casanare, Río Chicamocha y Río Cobugón - Río Cobaría para el periodo 1850 - 2017.

#### 6.2.4.6. SNSM

El glaciár de la SNSM presenta principalmente área glaciár para las cuencas Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho y otros directos al Caribe y Río Don Diego, para lo cual esta superficie glaciár es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas cuencas hidrográficas, en la tabla 32 se puede observar los datos de área para el periodo 1850 – 2017.

Glaciar	Cuenca	Año	Área Glaciar Total por año (Km <sup>2</sup> )	Área Glaciar Cuenca por año (Km <sup>2</sup> )	% de Área Glaciar con respecto al total por año
SNSM	Alto Cesar	1850	85.31	19.43	22.78
		1954	21.28	3.14	14.73
		1995	12.56	1.94	15.41
		2010	7.48	0.94	12.56
		2016	7.10	0.96	13.57
		2017	6.66	0.90	13.45
	Ciénaga Grande de Santa Marta	1850	85.31	31.11	36.47
		1954	21.28	8.54	40.15
		1995	12.56	4.96	39.51
		2010	7.48	3.58	47.90
		2016	7.10	3.00	42.19
		2017	6.66	2.82	42.30
	Río Ancho y Otros Directos al caribe	1850	85.31	32.31	5.82
		1954	21.28	9.36	151.83
		1995	12.56	5.66	45.07
		2010	7.48	2.96	39.53
		2016	7.10	3.14	44.24
		2017	6.66	2.94	44.25
	Río Don Diego	1850	85.31	2.46	2.88
		1954	21.28	0.24	1.15
		1995	12.56	0	0.00
		2010	7.48	0	0.00
		2016	7.10	0	0.00
		2017	6.66	0	0.00

**Tabla 31:** Datos de área glaciar de la SNSM para las cuencas del Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho y Río Don Diego comprendido en el periodo 1850 - 2017.

En la Figura 50 se puede observar que la cuenca que presenta mayor área glaciar para el año 2017 es la cuenca del Río Ancho con 2.94 km<sup>2</sup>, seguida de la cuenca Ciénaga Grande de Santa Marta con 2.82 km<sup>2</sup>, la cuenca del Alto Cesar con 0.90 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Don Diego que para el año 2017 no presenta área glaciar, solo para el año 1850 y 1954 presentaba un área de 2.46 km<sup>2</sup> y 0.24 km<sup>2</sup> respectivamente. Asociado a lo anterior, la cuenca que presenta el mayor retroceso glaciar es la cuenca del Río Ancho con 29.37 km<sup>2</sup>, seguido de la cuenca Ciénaga Grande de Santa Marta con 28.29 km<sup>2</sup>, la cuenca Alto Cesar con 18.53 km<sup>2</sup> y por último la cuenca del Río Don Diego con 2.46 km<sup>2</sup>, donde esta última cuenca para la actualidad ya no presenta área glaciar alguna, todos estos datos de área glaciar están comprendidos para el periodo 1850 – 2017.

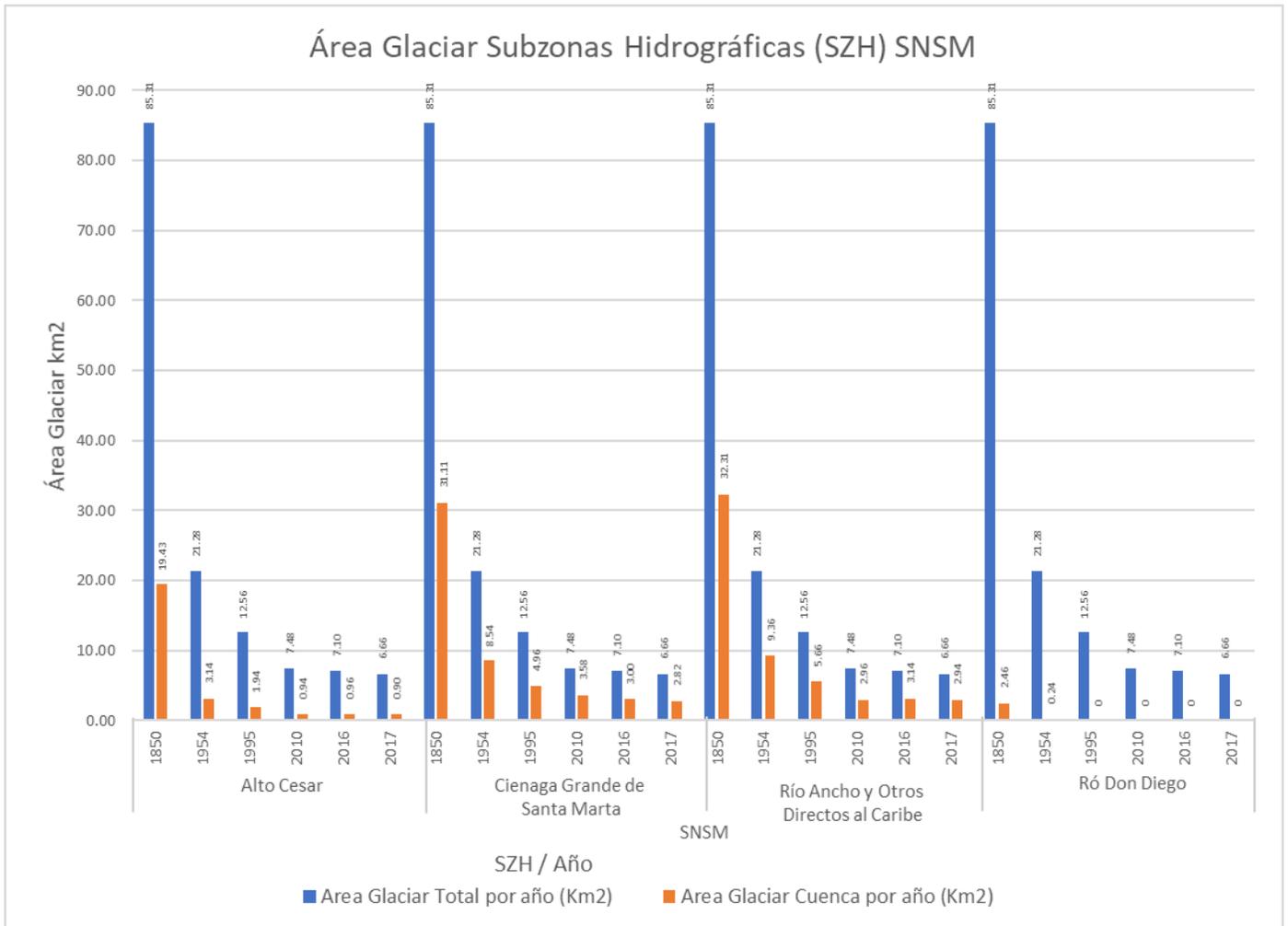


Figura 50: Comparación área glaciar de la SNSM por año para las cuencas del Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho y Río Don Diego para el período 1850 - 2017.

### 6.3. Parámetros Topográficos

Para la actualización del inventario de los glaciares colombianos, se procede a calcular una serie de parámetros por cuencas glaciares para cada una de estas superficies. Esto se realizará para el límite glaciar calculado para el año 2017. Los principales parámetros a calcular por medio de herramientas SIG son el Área (km<sup>2</sup>), Elevación (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto (Grados). A continuación, se mostrarán los resultados.

#### 6.3.1. Parámetros Topográficos Glaciar VNH – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del VNH para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

Para el glaciar VNH se obtienen 23 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto (Grados) u orientación. En la Tabla 33 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el VNH.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNH AÑO 2017									
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)				Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Media	Mediana	Min	Max	Media	Media
1	0.11	4766	5297	5004.55	5005	16.31	48.48	34.45	305.18
2	0.12	4752	5145	4909.85	4882	10.60	50.88	31.43	73.16
3	0.48	4660	5314	4990.95	4977	7.85	50.79	31.55	282.91
4	0.33	4624	5290	4922.69	4899	7.90	57.68	33.20	247.66
5	0.54	4658	5317	5017.90	5024	3.37	57.34	30.64	56.52
6	0.19	4743	5314	4943.00	4895	10.74	46.29	31.09	54.80
7	0.08	4816	5137	4951.03	4947	9.28	42.77	31.21	63.85
8	0.07	4847	5250	5034.55	5021	8.84	50.24	31.22	100.31
9	0.32	4756	5287	5029.16	5038	3.11	52.91	30.10	108.05
10	1.72	4531	5384	5000.05	5006	1.01	76.37	31.37	261.87
11	0.82	4626	5388	5014.56	5012	2.43	68.95	30.37	84.50
12	0.02	4740	4886	4811.62	4800	13.80	37.88	29.29	95.75
13	0.29	4771	5363	4994.30	4976	4.22	56.33	31.99	106.55
14	0.38	4715	5379	5059.73	5048	5.44	55.63	31.10	130.99
15	0.09	4913	5324	5080.38	5070	9.04	43.90	33.62	242.56
16	0.22	4713	5388	5075.10	5082	2.86	56.72	29.37	236.24
17	0.31	4620	5056	4864.05	4871	0.00	65.94	31.97	283.00
18	0.54	4614	5220	4882.71	4894	0.00	58.13	27.07	118.53
19	0.20	4642	5050	4803.89	4784	1.22	55.10	30.72	262.60
20	0.15	4675	4998	4851.90	4862	7.21	49.86	29.03	236.92
21	0.21	4632	5051	4877.75	4889	3.02	71.63	27.07	151.97
22	0.07	4721	5022	4821.70	4792	11.77	56.98	34.66	264.94
23	0.02	5159	5352	5264.60	5295	10.92	43.56	33.67	180.22

Tabla 32: Parámetros topográficos glaciar VNH (2017).

En la Figura 51 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar VNH para el año 2017.

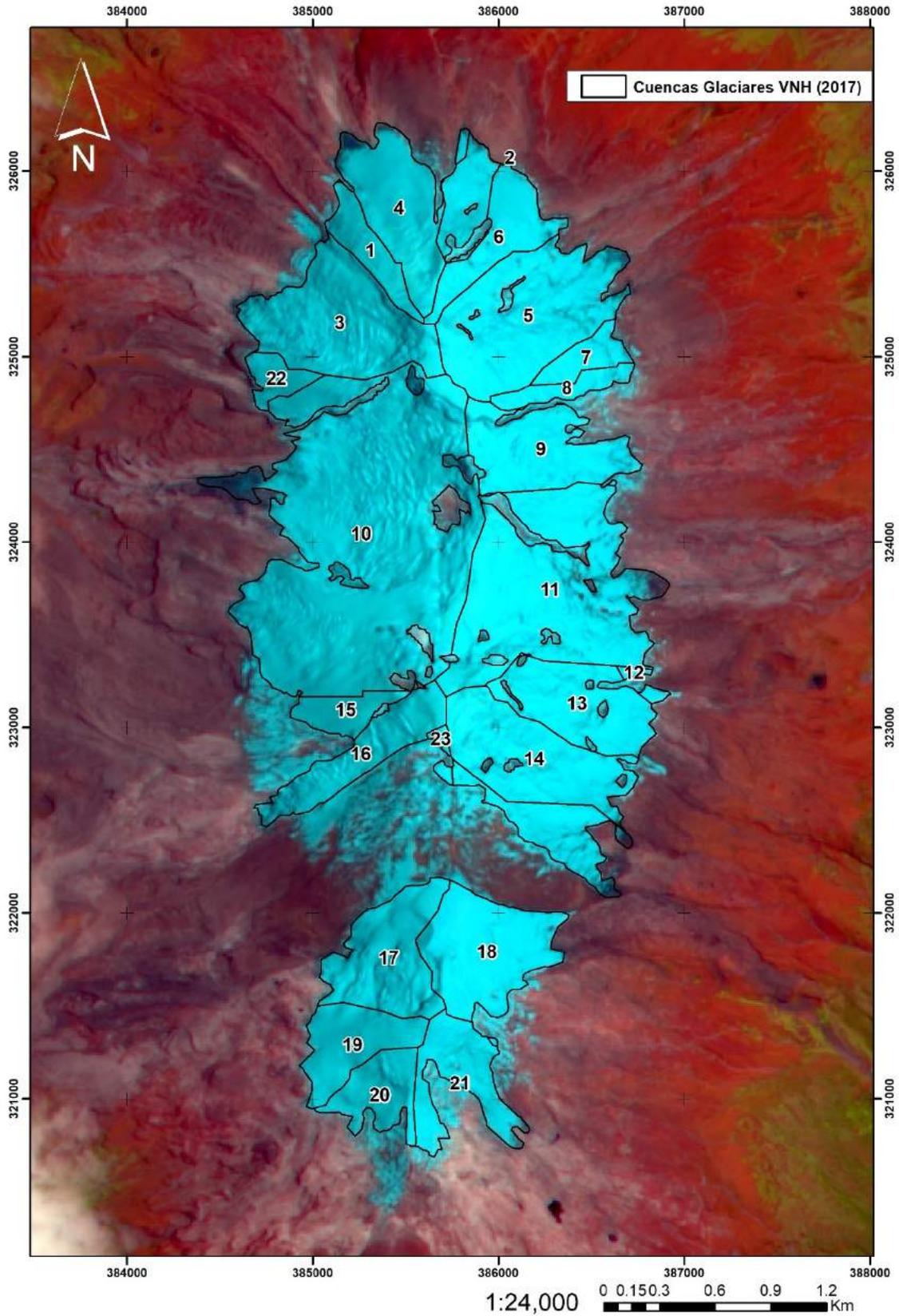


Figura 51: Cuencas glaciares para el glaciar VNH (2017).

### 6.3.2. Parámetros Topográficos glaciar VNT – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del VNT para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

Para el glaciar VNT se obtienen 6 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto u orientación. En la Tabla 34 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el VNT.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNT AÑO 2017									
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)				Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	Mean	Mean
1	0.08	4865	5113	5012.03	5014	13.83	59.06	34.06	312.86
2	0.02	4993	5204	5119.07	5116	6.60	52.43	31.65	76.11
3	0.15	4835	5215	5060.81	5077	2.72	57.37	33.66	206.77
4	0.06	5121	5214	5191.00	5196	1.07	38.27	12.47	149.26
5	0.14	4950	5214	5102.51	5107	0.34	53.00	32.18	238.37
6	0.12	4869	5218	5091.86	5107	1.82	54.04	30.77	197.82

Tabla 33: Parámetros topográficos glaciar VNT (2017).

En la Figura 52 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar VNT para el año 2017.

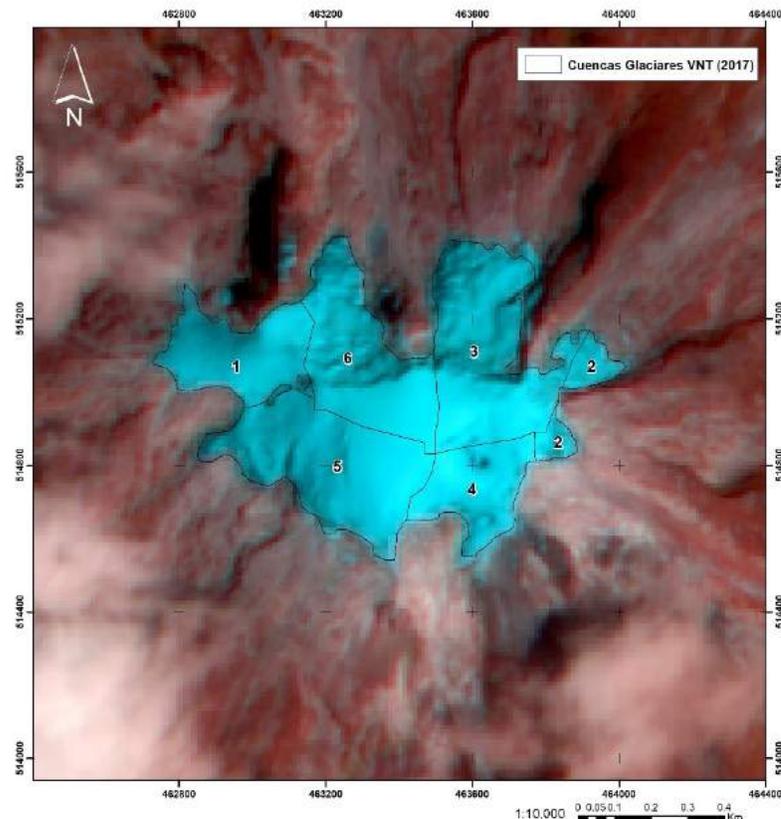


Figura 52: Cuencas glaciares para el glaciar VNT (2017).

### 6.3.3. Parámetros Topográficos glaciar VNSI – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del VNSI para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

Para el glaciar VNSI se obtienen 9 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto u orientación. En la Tabla 35 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el VNSI.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNSI AÑO 2017									
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)				Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	Mean	Mean
1	0.03	4807	4918	4861.69	4856	5.43	39.90	28.32	263.65
2	0.13	4800	4947	4868.00	4863	3.84	33.42	15.69	283.20
3	0.03	4920	4944	4933.93	4933	4.32	20.07	11.11	169.24
4	0.05	4774	4890	4831.63	4837	9.26	34.84	23.02	303.87
5	0.02	4780	4875	4822.29	4813	0.75	39.35	27.16	282.46
6	0.11	4771	4876	4822.58	4824	2.46	35.03	13.91	142.40
7	0.10	4772	4848	4818.14	4822	3.20	34.97	19.26	281.61
8	0.03	4842	4938	4901.52	4907	5.95	39.34	22.37	88.93
9	0.17	4730	4871	4791.87	4787	0.00	32.22	14.34	267.36

Tabla 34: Parámetros topográficos glaciar VNSI (2017).

En la Figura 53 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar VNSI para el año 2017.

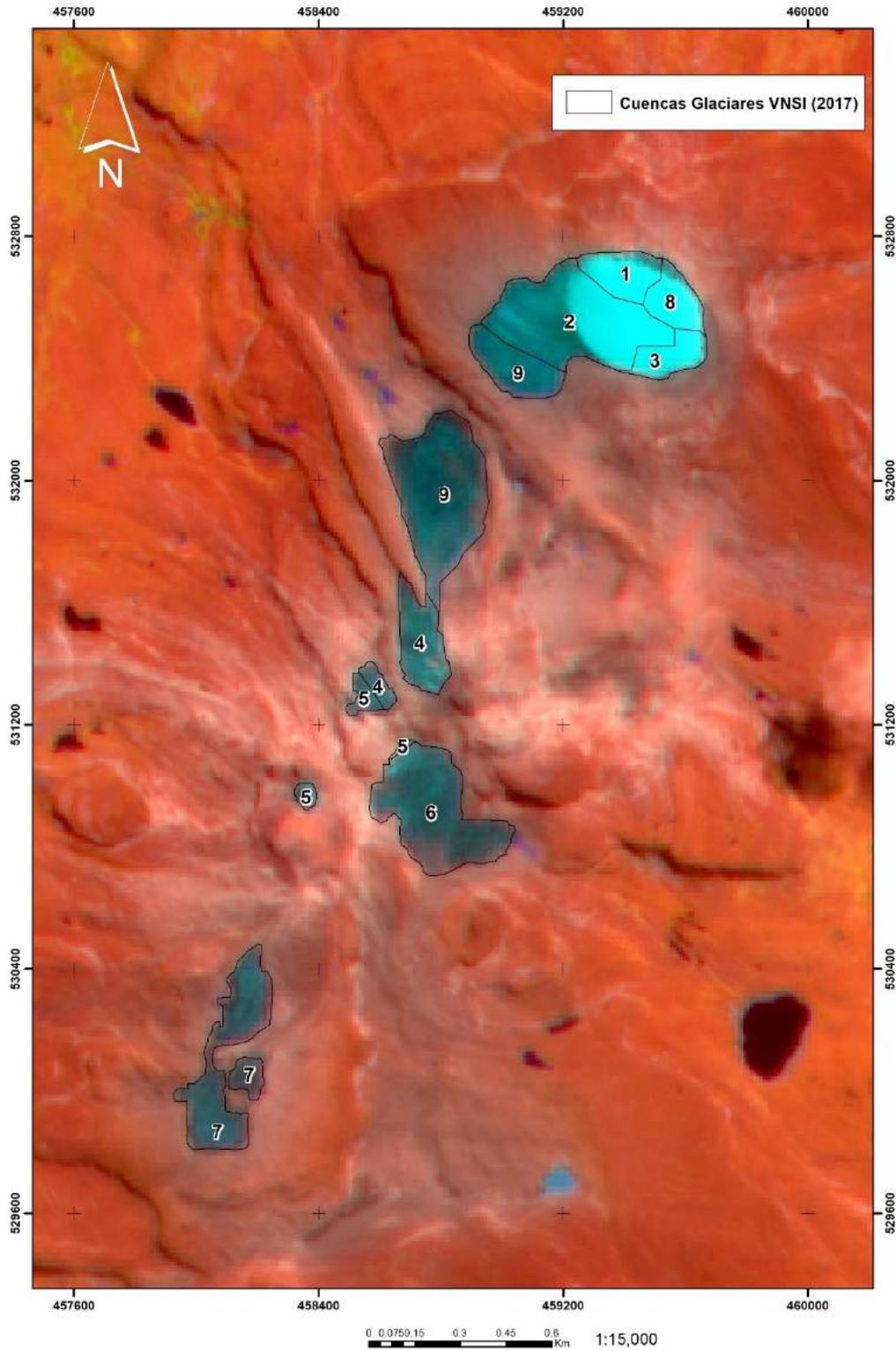


Figura 53: Cuencas glaciares para el glaciar VNSI (2017).

### 6.3.4. Parámetros Topográficos glaciar VNR – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del VNR para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

Para el glaciar VNR se obtienen 13 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto u orientación. En la Tabla 36 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el VNR.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR VNR AÑO 2017									
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)				Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	Mean	Mean
1	0.50	5097	5280	5213.85	5220	0.34	38.70	15.27	273.03
2	0.01	5083	5094	5088.00	5087	1.22	16.49	9.65	298.99
3	0.28	4993	5201	5132.23	5155	0.48	44.38	16.44	103.86
4	0.76	4990	5265	5194.52	5205	0.00	52.60	13.93	171.51
5	1.29	4837	5279	5141.22	5154	0.48	36.82	13.39	221.30
6	1.28	4929	5246	5115.15	5126	0.34	38.66	13.29	258.76
7	0.50	4927	5199	5078.14	5071	0.48	43.26	15.54	128.76
8	0.40	4867	5220	5041.11	5024	0.75	39.42	18.63	222.07
9	1.40	4637	5261	5110.34	5159	0.34	57.46	15.45	168.83
10	0.51	4904	5221	5108.69	5134	1.35	36.65	14.86	166.78
11	0.03	5148	5216	5192.55	5195	1.43	40.42	24.47	278.91
12	1.01	4878	5214	5105.07	5138	0.00	49.56	17.60	106.71
13	0.43	4889	5212	5112.25	5132	0.00	49.36	17.81	109.58

Tabla 35: Parámetros topográficos glaciar VNR (2017).

En la Figura 54 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar VNR para el año 2017.

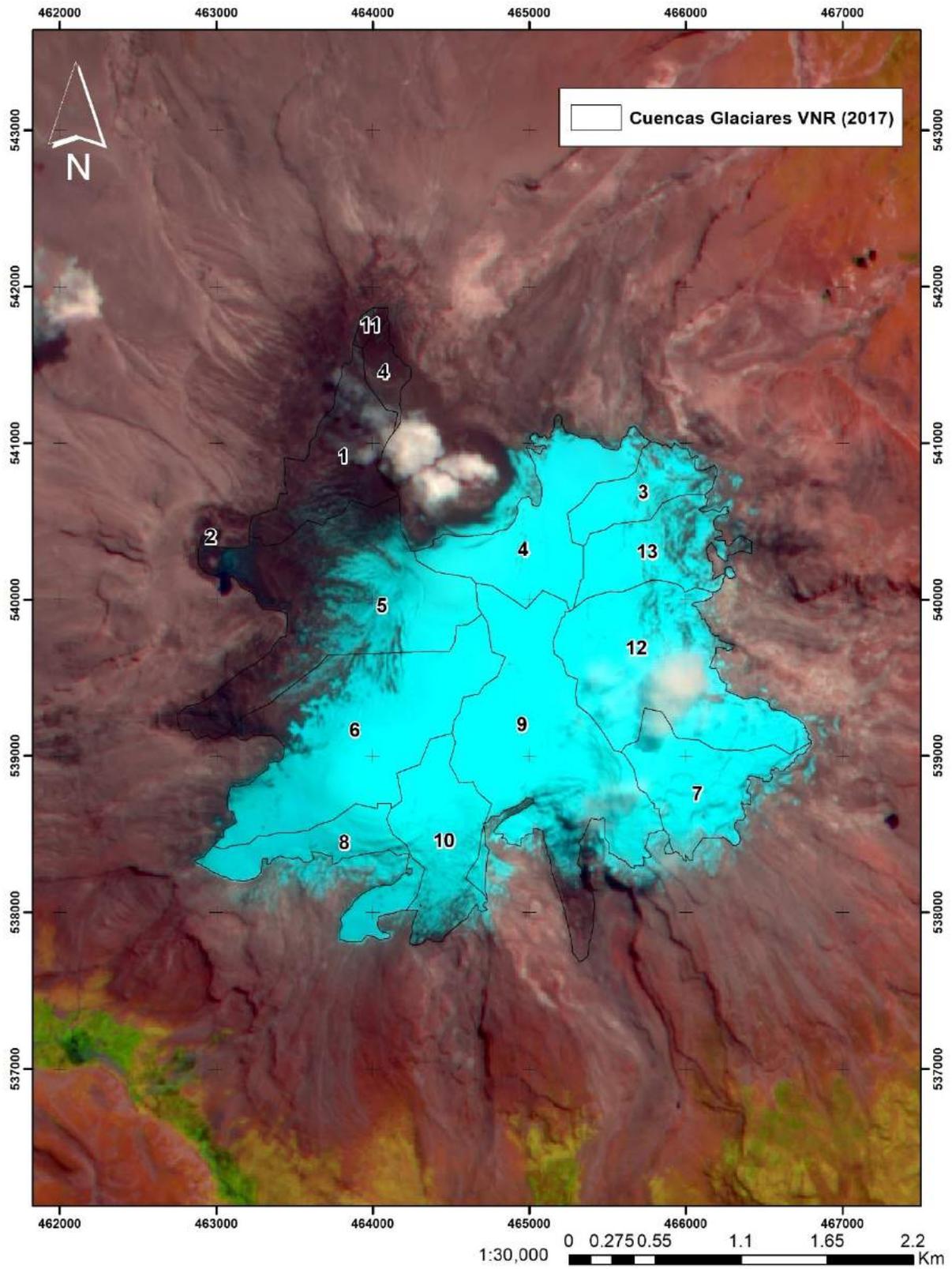


Figura 54: Cuencas glaciares para el glaciar VNR (2017).

### 6.3.5. Parámetros Topográficos glaciar SNCG – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del SNCG para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

Para el glaciar SNCG se obtienen 49 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto u orientación. En la Tabla 37 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el SNCG.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR SNCG AÑO 2017									
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)				Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	Mean	Mean
1	0.12	4824	4976	4883.89	4879	6.18	60.23	24.07	299.02
2	0.06	4833	5017	4945.07	4948	5.40	56.80	33.28	64.41
3	0.02	4970	4994	4985.14	4988	1.69	25.16	10.91	69.01
4	0.02	4990	5031	5010.13	5014	5.48	30.96	18.09	165.91
5	0.28	4663	5175	4932.94	4942	1.07	59.75	23.65	253.06
6	0.00	4975	5032	5001.75	4977	13.54	41.19	33.17	86.80
7	0.19	4852	5037	4940.81	4937	2.46	40.15	20.42	221.71
8	2.67	4728	5260	4978.30	4974	1.97	54.71	18.00	293.67
9	0.04	4942	5124	5034.42	5033	1.51	48.40	26.40	103.05
10	0.04	4887	5022	4953.58	4951	11.20	50.70	34.19	154.11
11	0.18	5001	5334	5188.28	5204	2.39	61.00	21.62	156.07
12	0.05	5050	5343	5218.44	5237	11.04	58.37	33.48	148.59
13	0.16	4857	5093	4976.87	4976	9.76	28.03	16.48	249.98
14	0.08	4921	5093	4975.31	4968	1.72	50.79	23.17	135.00
15	1.66	4727	5331	4988.25	4959	1.82	52.58	22.46	225.57
16	0.00	4852	4914	4879.17	4872	3.02	26.77	16.50	256.98
17	0.09	4814	4989	4917.59	4915	2.13	61.37	23.08	160.19
18	0.19	4818	4939	4881.92	4884	5.52	35.27	17.28	250.81
19	0.02	4936	4988	4955.06	4946	2.05	20.60	10.48	202.44
20	0.01	4872	4977	4929.12	4934	17.09	33.76	28.87	295.35
21	0.03	4948	5017	4985.00	4978	4.22	57.75	24.26	168.80
22	0.08	4859	5122	4981.10	4967	5.95	50.86	31.18	57.44
23	0.77	4701	5133	4927.35	4925	1.43	57.65	24.03	269.29
24	0.02	4877	4971	4942.11	4954	8.85	53.09	30.32	45.73
25	0.24	4741	5120	4896.44	4872	5.72	51.70	29.34	280.21
26	0.02	4936	5118	4999.50	4977	20.19	48.82	33.70	95.52
27	0.25	4660	5107	4835.15	4826	8.71	47.92	26.06	296.12
28	0.02	4852	5011	4907.63	4893	8.84	56.63	29.16	104.18
29	1.52	4704	5239	5014.63	5021	1.72	49.06	20.10	284.02

<b>30</b>	0.02	4774	4857	4814.48	4811	11.13	32.45	23.60	213.28
<b>31</b>	0.34	4688	5033	4848.24	4849	3.52	67.20	23.20	210.08
<b>32</b>	0.94	4788	5251	4969.53	4960	1.43	54.71	19.49	201.56
<b>33</b>	0.01	4990	5023	5004.83	5000	12.02	20.07	16.45	230.50
<b>34</b>	0.37	4719	5121	4891.26	4881	1.69	63.80	32.36	136.29
<b>35</b>	0.03	4784	5076	4999.56	5021	3.58	62.69	25.31	173.23
<b>36</b>	0.60	4677	5126	4912.44	4917	1.72	43.04	18.71	251.81
<b>37</b>	0.05	4743	4894	4804.23	4797	6.28	39.95	25.34	209.95
<b>38</b>	0.18	4769	4909	4837.29	4834	5.71	35.71	20.43	313.80
<b>39</b>	0.01	4758	4773	4764.86	4764	5.44	12.91	8.70	161.53
<b>40</b>	0.01	4880	4908	4891.86	4891	12.46	26.12	15.78	74.56
<b>41</b>	0.09	4648	4767	4701.11	4703	5.71	23.20	13.63	254.53
<b>42</b>	0.29	4828	5096	4933.78	4925	1.01	52.81	20.81	275.67
<b>43</b>	0.65	4709	5122	4943.98	4947	0.75	56.69	23.59	169.21
<b>44</b>	0.10	4877	5124	5041.89	5054	1.91	59.10	25.31	84.88
<b>45</b>	0.24	4738	5122	4953.51	4952	0.00	50.76	23.43	233.25
<b>46</b>	0.16	4838	5121	4998.56	5003	1.97	73.80	33.36	181.53
<b>47</b>	0.07	4801	5016	4905.32	4915	11.35	42.03	27.69	310.88
<b>48</b>	0.30	4745	5260	4978.76	4946	3.18	67.22	34.91	74.76
<b>49</b>	0.03	4910	5132	5050.95	5085	4.53	49.93	30.24	152.51

**Tabla 36:** Parámetros topográficos glaciar SNCG (2017).

En la Figura 55 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar SNCG para el año 2017.

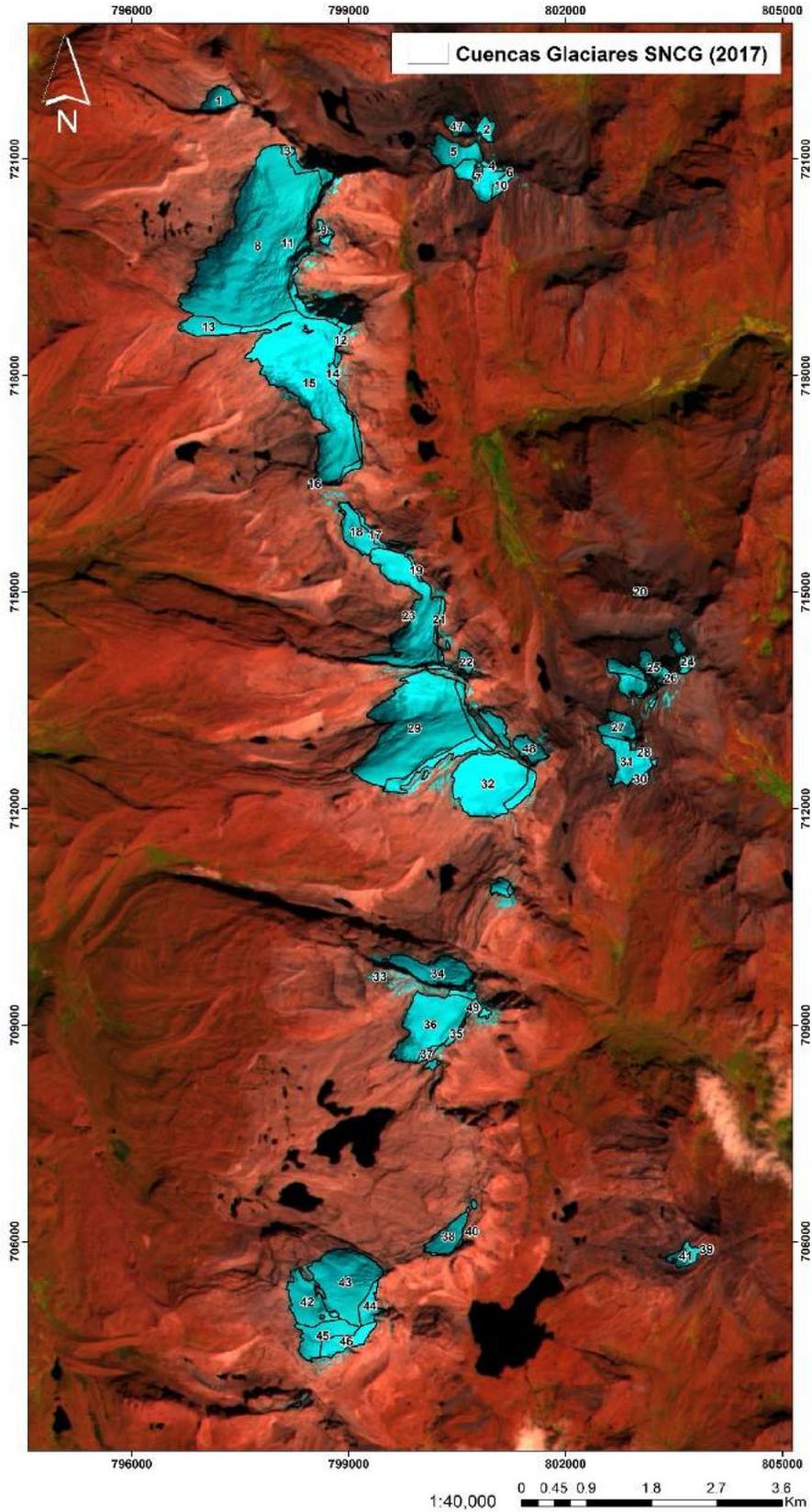


Figura 55: Cuencas glaciares para el glaciar SNCG (2017).

### 6.3.6. Parámetros Topográficos glaciar SNSM – 2017

A partir de la generación de cuencas glaciares con respecto al límite glaciar del SNSM para el año 2017, se obtienen algunos parámetros topográficos indispensables, esto con el fin de conocer a más detalle las características morfológicas en las cuales se emplazan estos glaciares.

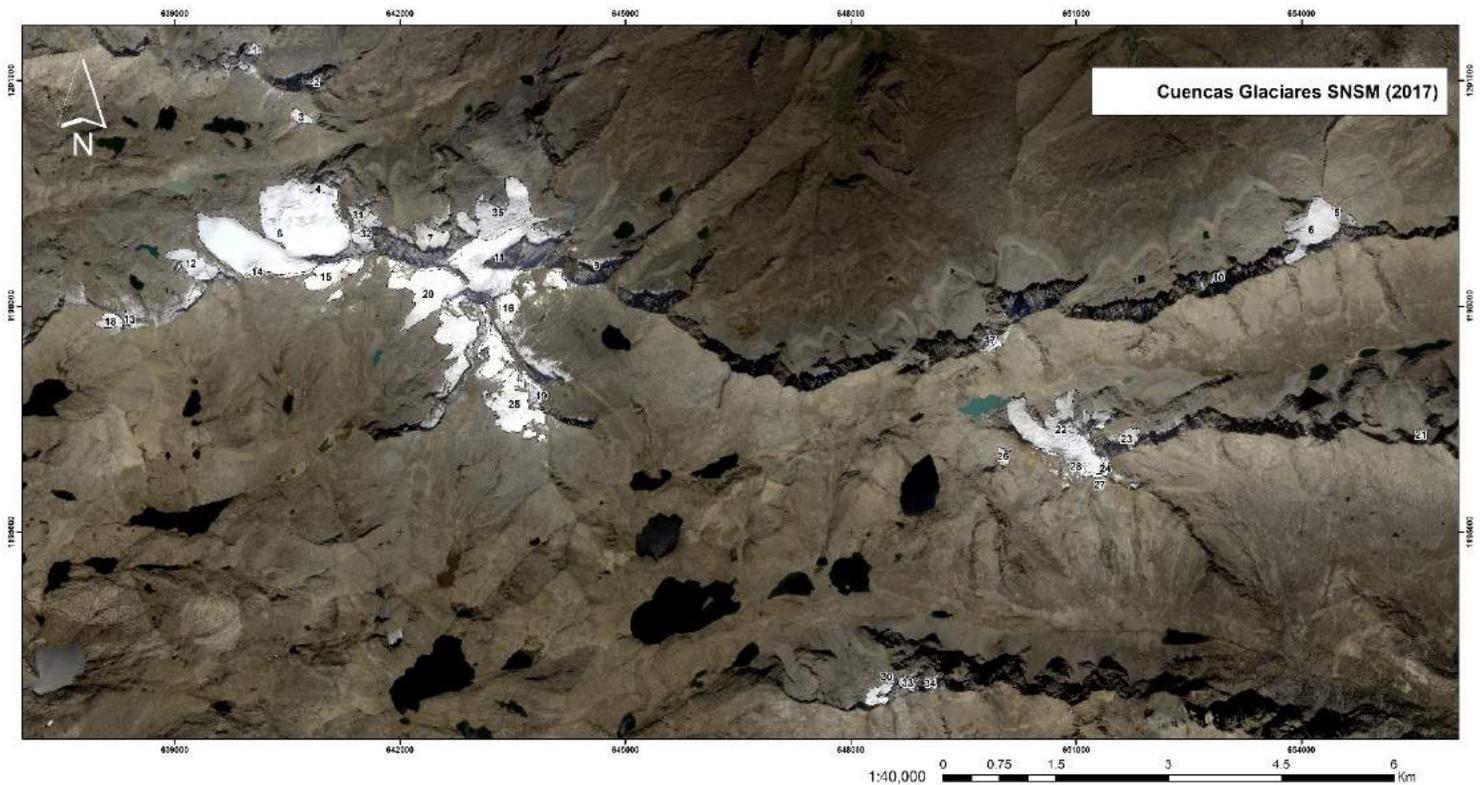
Para el glaciar SNSM se obtienen 35 cuencas glaciares, de los cuales se calculan datos de Área (Km<sup>2</sup>), Altura (mt), Pendientes (Grados) y Aspecto u orientación. En la Tabla 38 se observan los parámetros topográficos anteriormente nombrados para el SNSM.

PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS GLACIAR SNSM AÑO 2017								
# Cuenca Glaciar	Área Glaciar (km <sup>2</sup> )	Elevación (mt)			Pendientes (Grados)			Aspecto (Grados)
ID	Área km <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Mean
1	0.05	4861.47	5091.42	4958.66	24.74	54.25	40.92	324.49
2	0.01	4916.70	5030.60	4970.15	30.27	60.47	43.14	250.38
3	0.04	5047.24	5168.75	5102.36	5.81	30.30	21.39	273.69
4	0.07	4964.59	5250.21	5106.87	12.16	52.22	30.72	318.85
5	0.02	4922.00	4999.71	4953.09	20.55	33.05	27.31	24.88
6	0.35	4812.56	5235.86	5008.73	3.94	63.36	27.18	276.36
7	0.19	4850.10	5398.03	5049.08	3.32	66.42	28.69	263.97
8	1.63	4907.15	5512.11	5157.18	0.37	63.19	18.15	290.57
9	0.02	4896.52	5398.19	4952.42	25.88	64.86	45.65	217.10
10	0.04	4780.23	5028.04	4883.72	23.59	61.30	38.14	255.70
11	0.58	4947.80	5689.95	5324.29	0.61	61.50	25.43	167.00
12	0.16	4851.06	5236.87	5068.25	16.65	49.16	29.08	299.68
13	0.03	4991.71	5160.51	5094.14	6.89	40.25	30.30	215.07
14	0.02	5192.15	5306.70	5246.80	5.54	28.91	19.49	234.84
15	0.17	5173.35	5533.52	5328.15	5.26	40.71	28.70	201.17
16	0.18	5289.00	5678.78	5476.76	4.28	43.11	25.29	158.15
17	0.02	4975.42	5194.15	5126.46	9.89	57.02	34.71	299.86
18	0.05	4928.18	5152.61	5017.61	12.70	35.54	23.18	263.94
19	0.01	5389.93	5522.65	5487.17	15.33	31.24	22.93	183.40
20	0.85	5001.68	5687.37	5292.19	4.79	57.86	27.21	235.51
21	0.02	4758.63	4930.53	4826.59	28.78	54.13	40.60	327.99
22	0.71	4711.16	5440.58	5103.17	2.27	61.78	30.60	244.58
23	0.09	4913.50	5414.18	5082.20	9.59	70.00	32.77	74.53
24	0.03	5155.71	5437.59	5351.61	4.12	41.01	16.95	69.83
25	0.53	5074.41	5567.90	5264.75	2.37	54.55	27.56	215.02
26	0.03	4971.30	5109.92	5051.00	10.82	53.42	30.63	283.77
27	0.01	5398.38	5432.51	5416.01	8.13	35.36	18.38	222.79
28	0.03	5192.17	5414.97	5331.14	11.58	50.72	31.70	246.85
29	0.00	5428.26	5439.59	5433.45	6.41	31.92	21.75	182.56

<b>30</b>	0.07	4797.22	4975.09	4869.14	19.30	55.43	32.78	306.35
<b>31</b>	0.06	5057.47	5340.91	5187.22	9.78	59.95	37.48	77.58
<b>32</b>	0.11	5078.47	5557.52	5331.44	4.29	57.50	35.72	150.31
<b>33</b>	0.03	4881.55	5086.20	4984.31	12.89	54.39	43.77	276.42
<b>34</b>	0.01	4903.71	5054.11	4965.74	39.75	61.23	51.34	205.17
<b>35</b>	0.43	4799.06	5266.35	5060.95	2.80	54.04	27.69	158.21

**Tabla 37:** Parámetros topográficos glaciar SNSM (2017).

En la Figura 56 se pueden visualizar las cuencas glaciares para el glaciar SNSM para el año 2017.



**Figura 56:** Cuencas glaciares para el glaciar SNSM (2017).

Esta información es complementaria para análisis multitemporales de evolución glaciar con parámetros de otros periodos con el fin de determinar la variación de las cotas mínimas del glaciar.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. Imágenes Satelitales Sentinel 2

Las imágenes satelitales son una gran herramienta a la hora de realizar estudios de clasificación de coberturas, en este caso la cobertura glaciada que posee Colombia es única y por sus características tanto geográficas, altitudinales, geológicas, etc., los hace un gran laboratorio para el continuo monitoreo de estas superficies.

Por su parte las imágenes Sentinel 2 son una gran herramienta para este tipo de monitoreos, gracias a sus grandes características como resolución espacial, temporal, espectral y no menos importante fácil adquisición, lo hace un material de gran interés e importancia no solo para este tipo de trabajos, si no para cualquier trabajo que requiere datos confiables y precisos.

### 7.2. Área y Retroceso Glaciar - Año 2017

Gracias a la metodología implementada se logró identificar el área glaciar para cada uno de los glaciares que posee Colombia, donde se obtiene que para el año 2017 el área glaciar para el país es de aproximadamente 36.89 km<sup>2</sup>, calculándose un retroceso de 2.23 km<sup>2</sup> con respecto al año 2016.

Puntualmente para cada superficie glaciar se encontraron cambios significativos con respecto al año 2016, pero el glaciar que sobresale con estos cambios es el VNSI con un retroceso de 36.16% lo que es aproximadamente un área de 0.37577 km<sup>2</sup>; esta pérdida de área glaciar se puede interpretar de varias formas, en este caso la elevación es uno de los factores que provoco el rápido retroceso, teniendo en cuenta que los glaciares para que puedan conservarse deben poseer alturas mayores a los 5000 mt, este glaciar posee una elevación máxima de 4947 mt, lo que implica que con esta elevación él glaciar es muy susceptible a cambios climáticos y esto se ve evidenciado en la gran pérdida de área que ocurrió para este periodo de tiempo, asociado a lo anterior, el Fenómeno del Niño ocurrido para los años 2015 – 2016 dejo grandes secuelas sobre los glaciares del PNN Los Nevados especialmente para el glaciar VNSI, donde el IDEAM reporto perdidas de espesor de aproximadamente 7.6 mt, lo que es exageradamente alto para un glaciar con las dimensiones que posee. También otro factor importante para la perdida de área de este glaciar es la continua actividad volcánica por parte del VNR, toda esta emisión de ceniza ha cubierto en su totalidad al glaciar del VNSI, ocasionando un cambio en el albedo y por ende un efecto de absorción de calor provocando más rápidamente el deshielo en algunas zonas de este glaciar.

En el caso de sus dos hermanos como los apodan, los glaciares del VNT y el VNR presentaron áreas de 0.5762 km<sup>2</sup> y 8.40 km<sup>2</sup> respectivamente con un retroceso glaciar con respecto al año 2016 de aproximadamente 0.0536 (8.5%) para el VNT y 0.6337 (7%) para el VNR. Contrario a lo que le sucede al VNSI estos dos

glaciares no están afectados por su elevación, ya que la mayoría de sus masas glaciares poseen alturas por encima de los 5000 mt donde el VNT tiene una altura máxima de 5218 mt y 5280 mt para el VNR, si bien presentan porcentajes de retroceso considerables, estos por sus elevaciones se conservan mucho mejor.

Ahora bien el glaciar del VNH para el 2017 presento un área glaciar de 7.2993 km<sup>2</sup> y un retroceso de 0.1730 km<sup>2</sup> con respecto al 2016, este retroceso se traduce en un 2.3%, el más bajo calculado para todos los glaciares, esto se puede deber a que la mayoría de las masas glaciares de este están por encima de los 5000 mt con una altura máxima de 5388 mt, el cual es considerado el de mayor elevación de los glaciares de la cordillera central; aunque este glaciar actualmente está sobre una estructura volcánica activa, esta no ha afectado en gran medida el glaciar para este periodo de tiempo.

El glaciar de la SNSM, el más septentrional de los seis glaciares que posee Colombia, presento un área glaciar para el año 2017 de 6.6550 km<sup>2</sup>, con un retroceso glaciar de 0.4482 km<sup>2</sup> con respecto al 2016, este retroceso se traduce en un 6.3% de pérdida, esto se puede deber a la ubicación geográfica del glaciar, ya que se encuentra en el macizo litoral más alto del mundo, aunque este sea el glaciar más elevado de todo el territorio colombiano, con una altura máxima de 5690 mt, su ubicación geográfica lo hace propenso a pequeños deshielos.

Por último, el glaciar de la SNCG, el único glaciar de la cordillera oriental y el más extenso de los seis glaciares colombianos. Para el 2017 presento un área glaciar de 13.3249 km<sup>2</sup> con un retroceso de 0.5717 km<sup>2</sup> con respecto al 2016, este retroceso se traduce en un 4.1%. En cuanto a los datos anteriores se habla de una estabilidad de este glaciar ya que para su gran extensión el retroceso antes mencionado no es tan significativo, esta estabilidad se debe a que en el año 2017 tuvo una ganancia de masa glaciar como se puede observar en la Figura 57, esto asociado a factores como la elevación del glaciar, donde se tiene que la mayoría de sus masas glaciares están por encima de la elevación de los 5000 mt con una altura máxima de 5343 mt. Según el IDEAM otro factor para la preservación de este glaciar es la humedad proveniente del oriente colombiano (Orinoquia) provocando altas precipitaciones de nieve.

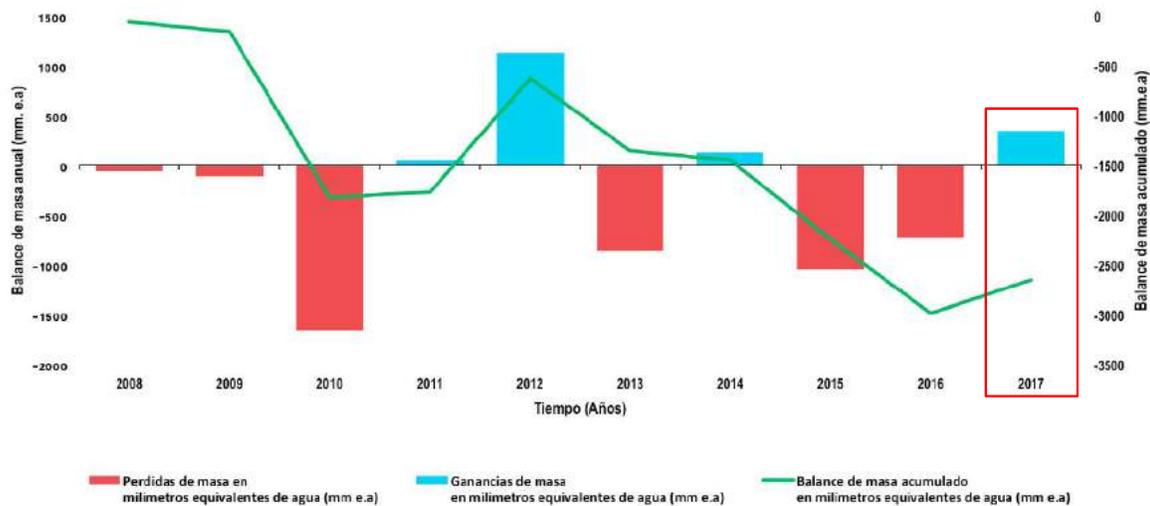


Figura 57: Balance de Masa Anual y Acumulado del Glaciar Sierra Nevada de El Cocuy o Güicán (IDEAM, 2018).

### 7.3. Factores que influyen en el Retroceso Glaciar en Colombia

Si bien los glaciares colombianos se denominan tropicales por estar ubicados en el ecuador, se pensaría que esta sería la característica más importante para el retroceso de estos, pero en realidad son varios factores además del ya mencionado los que influyen en este proceso de desgaste.

#### 7.3.1. Elevación

Los glaciares colombianos también se denominan glaciares de alta montaña, ya que la gran mayoría de estas masas glaciares se encuentran a más de 5000 m.s.n.m., por lo que glaciares donde sus masas se encuentren por debajo de esta elevación son más propensos al desgaste, ejemplo de esto es el glaciar del VNSI, este glaciar posee una altura máxima de 4947 mt, lo que lo clasifica como un glaciar bajo teniendo en cuenta las características de los demás glaciares colombianos. Este factor influye mucho sobre la estabilidad de un glaciar ya que para que estos sean estables es necesario que la mayoría de la masa glaciar se encuentre por encima de los 5000 mt ya que a esta elevación son más factibles la caída de nieve, formación de hielo y la baja temperatura, un glaciar que se encuentre por debajo de esta elevación es fatal ya que la temperatura ambiente ronda entre los 5°C y los 7°C provocando un mayor derretimiento de estas superficies, esto se vio reflejado en el retroceso glaciar del VNSI calculado entre los años 2016 – 2017 el cual fue de 36.16% (0.37 km<sup>2</sup>), el más alto registrado para todos los glaciares colombianos.

#### 7.3.2. Fenómenos Atmosféricos

Colombia cada cierto periodo de tiempo es afectado por fenómenos atmosféricos provocados por las altas y bajas intensidades de los vientos alisios en el océano pacifico provocando calentamiento o enfriamiento de este, a lo que se forman los

denominados Niño (temporadas secas, altas temperaturas) y Niña (temporada fría, bajas temperaturas). Estos cambios climáticos globales afectan ya sea de manera positiva o negativa las superficies glaciares en todo el mundo, en Colombia es un caso especial, ya que estos al ser tropicales tienen mucha más influencia negativa cuando se produce un fenómeno de estos, especialmente el del “Niño”, este los afecta en gran medida por las fuertes temporadas secas, poca formación de nubes a lo que conlleva que la radiación solar influya directamente sobre estas superficies. Ejemplo de esto, el fenómeno del Niño ocurrido para el 2015 – 2016 (considerado el más fuerte de las últimas décadas) dejó grandes secuelas sobre todos los glaciares colombianos en especial sobre el VNSI ya que este al ser tan bajo (4947 mt) es mucho más propenso a las secuelas de este fenómeno y esto se ve reflejado en los resultados de este trabajo.

### 7.3.3. Actividad Volcánica

Varios de los glaciares colombianos se encuentran sobre estructuras volcánicas activas como es el caso del VNH y el VNR, estos han tenido en la última década una actividad constante, esta actividad volcánica relacionada con la expulsión de ceniza, provoca un esparcimiento en los alrededores de estos. El caso más notorio es el del VNR el cual continuamente expulsa material desde el 2010. Este material se deposita en los glaciares circundantes como el del propio VNR, el del VNSI y el del VNT, si bien el glaciar del VNR es el que más recibe de este material el glaciar del VNSI también es afectado en gran medida sobre esta actividad.

La depositación de este material sobre estas superficies afecta en gran medida el albedo de estas, definiendo el albedo como la capacidad de reflejar la radiación de una superficie, según el IDEAM, los glaciares que no poseen ceniza poseen un albedo de aproximadamente del 90%, mientras que estas superficies con ceniza poseen un albedo de aproximadamente del 40%, esto afecta en gran medida estos glaciares en especial el del VNSI, el cual tiene gran influencia de depositación de este material sobre el glaciar afectando el albedo (Figura 58).



**Figura 58:** Glaciar VNSI con depósitos de ceniza provenientes de la actividad efusiva del VNR (IDEAM, 2018).

Si bien el VNR está afectado en gran medida por esta actividad, su glaciar se ha mantenido relativamente estable por el alto aporte de este material efusivo, el IDEAM ha reportado depósitos de ceniza sobre el glaciar de aproximadamente 20 cm protegiendo térmicamente el glaciar (Figura 59) efecto contrario a lo que sucede en el VNSI donde los depósitos tienen muy poco espesor.



**Figura 59:** Capa de ceniza con un espesor aproximadamente entre 15 a 20 cm sobre el glaciar VNR (IDEAM, 2018).

## 8. CONCLUSIONES

- A partir de las imágenes satelitales Sentinel 2 y la metodología utilizada se determinaron las áreas de los seis glaciares colombianos para el año 2017 donde, los glaciares VNH, VNT, VNSI, VNR, SNCG y SNSM tuvieron un área glaciar del 7.29 km<sup>2</sup>, 0.57 km<sup>2</sup>, 0.66 km<sup>2</sup>, 8.4 km<sup>2</sup>, 13.32 km<sup>2</sup> y 6.65 km<sup>2</sup> respectivamente, con un total de área glaciar para Colombia de 36.89 km<sup>2</sup> ~ 37 km<sup>2</sup>.
- El retroceso para cada uno de los glaciares entre 2016 y 2017 fue de 0.1730 km<sup>2</sup> (2.3%) para el VNH, 0.0536 km<sup>2</sup> (8.5%) para el VNT, 0.3225 km<sup>2</sup> (36.16%) para el VNSI, 0.6337 km<sup>2</sup> (7%) para el VNR, 0.5717 km<sup>2</sup> (4.1%) para la SNCG y 0.4482 km<sup>2</sup> (6.3%) para la SNSM.
- Una vez determinada el área glaciar para Colombia en el año 2017 (37 km<sup>2</sup>), fue posible calcular el retroceso glaciar con respecto al año 2016 (39.15 km<sup>2</sup>) el cual fue de 2.23 km<sup>2</sup> de área glaciar desaparecida.
- El retroceso glaciar en Colombia está asociada a factores tanto climáticos, de elevación y geológicos, que combinados pueden ocasionar grandes cambios en las superficies de estos glaciares, un ejemplo de estos es el Glaciar VNSI donde este redujo considerablemente su área en solo un año, esto debido a la elevación de sus masas glaciares (altura máxima 4947 mt) las cuales se encuentran por debajo de los 5000 mt, otro factor importante es el aporte de material volcánico proveniente del Ruiz, ya que este material afecta el albedo de la superficie glaciar y por último los efectos atmosféricos como por el ejemplo El Niño que ocurrió para los años 2015 – 2016 que afectaron de forma negativa todo los glaciares en el territorio colombiano pero en gran medida al VNSI por la elevación de este glaciar.
- Solo dos glaciares en el territorio colombiano presentan estabilidad para este periodo de tiempo, los cuales son el glaciar del VNH y el glaciar del SNCG, ambos presentaron un retroceso de 2.3% y 4.1% respectivamente con respecto al año 2016, si bien cada uno se comporta de forma diferente, algo en común que posee estos dos glaciares es que la mayor parte de sus masas están por encima de la altura mínima para que un glaciar se conserve que es por encima de los 5000 mt, siendo estos los dos glaciares más altos tanto en la cordillera central como en la oriental.
- Los glaciares colombianos al ser glaciares tropicales andinos, son muy susceptibles al más mínimo fenómeno atmosférico, por lo que los hace únicos en el mundo e importantes para el monitoreo y estudio del comportamiento evolutivo de estos.
- Una vez calculado los parámetros topográficos para cada una de las cuencas glaciares, se puede determinar la gran variación topográfica que

cada superficie glaciar posee, para lo cual estos datos son de gran utilidad para realizar estudios de evolución temporal a nivel más detallado y así complementar mucho más la información sobre nuestros glaciares.

- Como información complementaria se calcula el área glaciar tanto para Municipios, CAR's, PNN y Subzonas Hidrográficas, con el fin de detallar que zonas geográficas poseen aun área glaciar para cada temática anteriormente expuesta.

## 9. RECOMENDACIONES

- Si bien las imágenes Sentinel 2 dan buenos resultados aplicando este tipo de metodologías, para análisis de periodos de tiempo tan cortos (año a año) y el tamaño de los glaciares los cuales son muy pequeños, se hace más complicada la delimitación de estos cuerpos por la resolución espacial de estas imágenes (10 mt), para lo cual se requieren de insumos de mejor resolución (menor a 1 mt) para una óptima interpretación del límite glaciar, pero aun así los resultados que arroja esta metodología con las imágenes Sentinel 2 son muy acertados.
- A partir de los parámetros topográficos calculados, posteriormente se pueden realizar análisis multitemporales a más detalle para cada uno de los glaciares, complementado con el área glaciar y con el área para cada uno de las temáticas como Municipios, PNN, CAR's y Subzonas Hidrográficas, esto con el fin de realizar la evolución glaciar para estas superficies en Colombia a través de los años.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, A., & Liliana, R. (2017). Evolución del glaciar del volcán Nevado del Huila a través del tratamiento de imágenes satelitales (1987-2016).

Ceballos, J., & Tobón, E. (2007). Glaciares Colombianos: evolución reciente y estado actual. *Boletín de Geología*, 29(2).

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.

Chuvienco, E., & Hantson, S. (2010). Procesamiento estándar de imágenes Landsat, 1–21.

Colmenares, F., Mesa, A. M., Roncancio, J., Arciniegas, E., Pedraza, P., Cardona, A., ... Vargas, A. F. (2007). Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26,27, 33, 34 y 40. Proyecto: "Evolución geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta." *Ingeominas-Invemar-Ecopetrol-ICP-Geosearch Ltda.*, 401.

Copé de los Mozos, R. (2014). Cálculo del retroceso glaciar en Isla Livingston y de su línea de costa para actualización de cartografía.

ESA, (2015). Sentinel-2 User Handbook.

Fuentes, J., Guillermo, S., Ing, E., Renovables, N., De, F., & Agronómicas, C. (2008). Principales aplicaciones de los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +) de LandSat para el estudio de glaciares., 1–6.

García Cantillo, L. J. (2017). Análisis multitemporal del retroceso glaciar del volcán Nevado del Huila ubicado en los departamentos del Cauca y Huila en los años 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016 (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).

Gómez Arbeláez, J. (2016). Detección de cambios en el glaciar del volcán Nevado del Ruiz entre los años 1959 y 2014 [recurso electrónico] (Doctoral dissertation).

Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindshadler, R. A., & Siddalingaiah, H. (1987). Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data. *Annals of Glaciology*, 9(1), 104-108.

Herrera, G., & Ruiz, J. (2009). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*, 1(13), 27–36.

IDEAM. (2012). Glaciares de Colombia, más que una montaña con hielo.

IDEAM. (2018). Informe del Estado de los Glaciares Colombianos.

INGEOMINAS. (1981). Geología Regional de la Sierra Nevada del Cocuy, Plancha 137, "El Cocuy". Informe N° 1877.

Jacobs, J. D., Simms, É. L., & Simms, A. (1997). Recession of the southern part of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, between 1961 and 1993, determined from digital mapping of Landsat TM. *Journal of Glaciology*, 43(143), 98-102.

Jenson, S. K. y J. O. Domingue. 1988. "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.

Kääb, A., Winsvold, S. H., Altena, B., Nuth, C., Nagler, T., & Wuite, J. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity. *Remote Sensing*, 8(7), 598.

Kulkarni, A. V. (2007). Effect of global warming on the Himalayan cryosphere. *Jalvigyan Sameeksha*, 22, 93-108.

Llinás, T. A. y Meneses, A. F.I, (2004). El Retroceso Glaciar del Volcán Nevado Santa Isabel y su Indecencia Hídrica en la Ciudad de Pereira. Trabajo de grado para optar al título de Geógrafo, Universidad Nacional de Colombia.

Medina, G., & Mejía, A. (2010). El Niño y La Niña en el comportamiento de glaciares tropicales en Perú.

Müller, W. U., Laroque, C., Dingeldey, C. (2016). Sentinel-2 MSI – Level 2<sup>a</sup> Prototype Processor Installation and User Manual. Telespazio VEGA. 51p.

Nuth, C., and A. Kääb. 2011. "Co-Registration and Bias Corrections of Satellite Elevation Data Sets for Quantifying Glacier Thickness Change." *The Cryosphere* 5 (1): 271–90. doi:10.5194/tc-5-271-2011.

Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, (12), 111-119.

Paul, F., Barry, R. G., Cogley, J. G., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., ... & Zemp, M. (2009). Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50(53), 119-126.

Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 8(7), 575.

Peña Suárez, J. C. (2015). Análisis multitemporal del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy ubicada en los departamentos de Boyacá y Arauca entre los años 1992, 2003 y 2014 (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).

Rastner, P., Bolch, T., Notarnicola, C., & Paul, F. (2014). A comparison of pixel- and object-based glacier classification with optical satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(3), 853-862.

Rees, W. G. (2010). Remote Sensing of Glaciers. Library (p. 330).

Rott, H. (1994). Thematic studies in alpine areas by means of polarimetric SAR and optical imagery. *Advances in Space Research*, 14(3), 217-226.

Secretaria General de la Comunidad Andina, Instituto de Investigación para el Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, & Agencia Español de Cooperación Internacional. (2007). *¿El Fin de las Cumbres Nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina*.

Tobar., M. F. M., (2016). Estimación Del Retroceso Glaciar En El Parque Nacional Natural De Los Nevados -Pnnn- A Través Del Uso De Imágenes Ópticas E Interferometría Diferencial -Dinsar-. (2010-2015).

UNEP. (2008). Global Glacier Changes: facts and figures, WGMS, 88.

Vargas Gonzáles, C., Villon Reinoso, C., & Pasapera Gonzáles, J. (2009). Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto, 25-30.

Vargas, C. A., Koulakov, I., Jaupart, C., Gladkov, V., Gomez, E., El Khrepy, S., & Al-Arifi, N. (2017). Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography. *Scientific Reports*, 7.

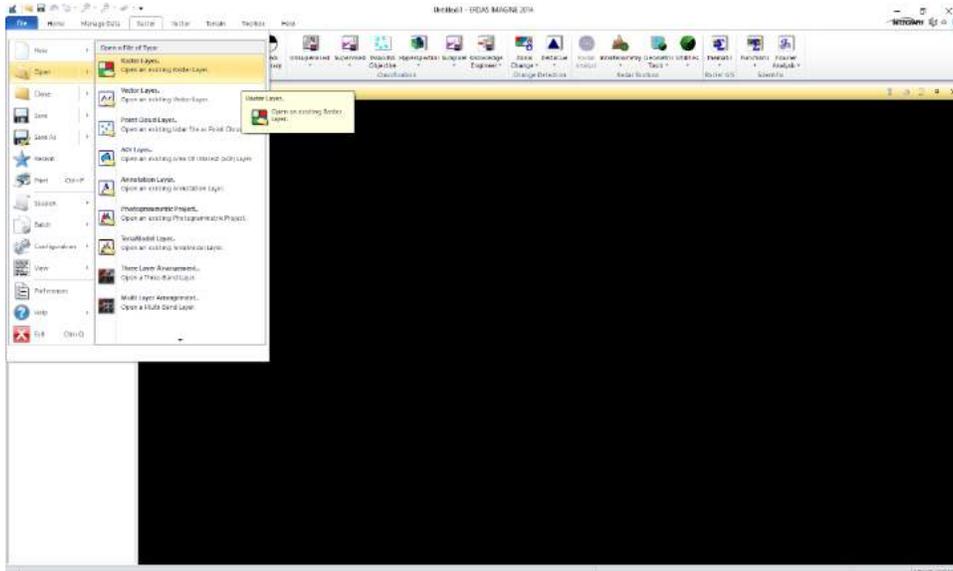
WGMS 2017. *Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015)*. Zemp, M., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Huber, J., Machguth, H., Paul, F., and Hoelzle, M. (eds.), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 244 pp.

Williams, J., Richard, S., Hall, D. K., & Benson, C. S. (1991). Analysis of glacier facies using satellite techniques. *Journal of Glaciology*, 37(125), 120-128.

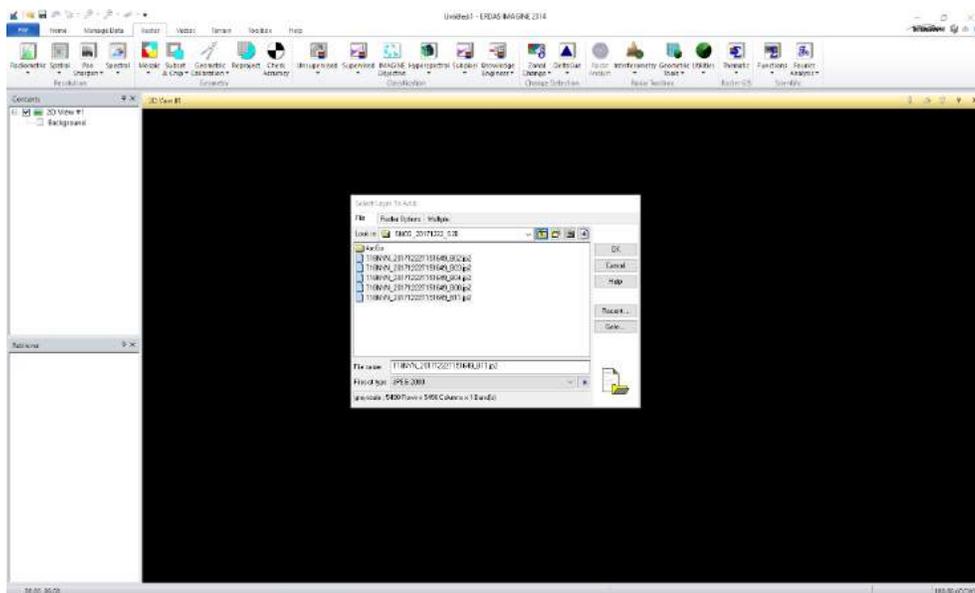
## 11. ANEXOS

### 11.1. Anexo 1: Metodología Visualización Imágenes Sentinel 2 (ERDAS)

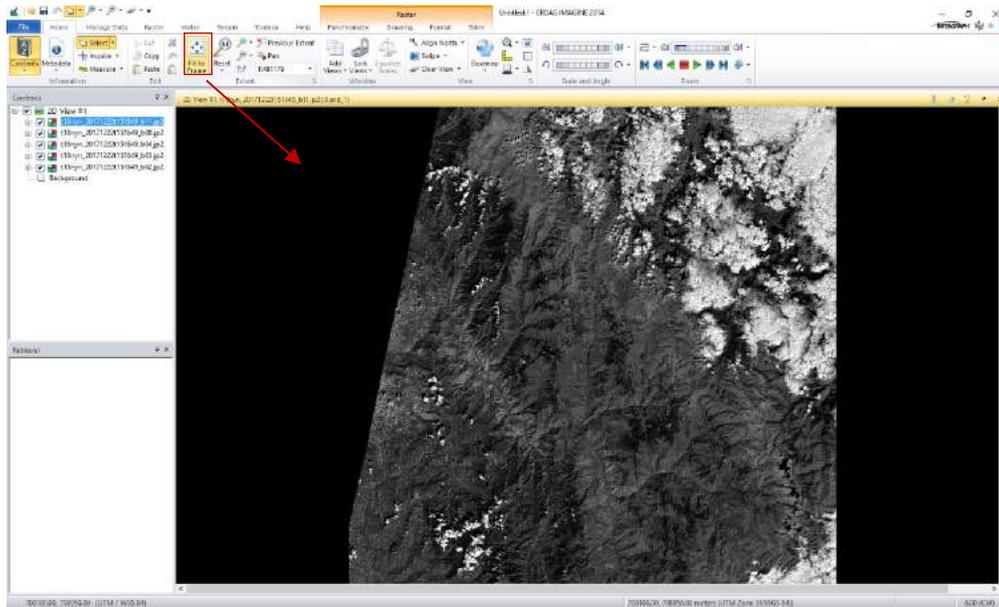
- *File – Open – Raster Layer*



- *Seleccionamos las imágenes b2, b3, b4, b8 y b11, en este caso del glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy o Güicán (SNCG):*

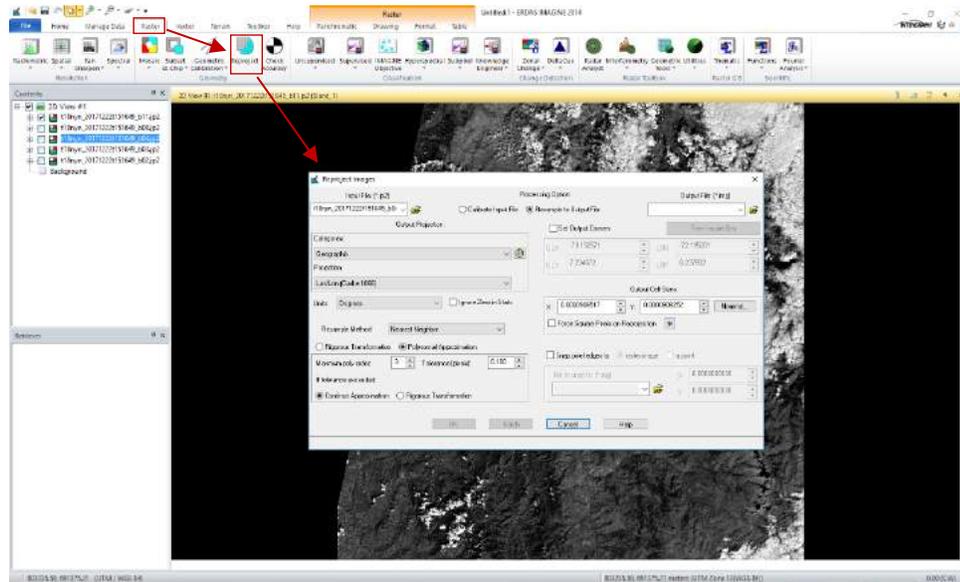


- Una vez cargadas las imágenes damos click en la opción Fit to Frame para visualizar el conjunto de imágenes en el espacio de trabajo:

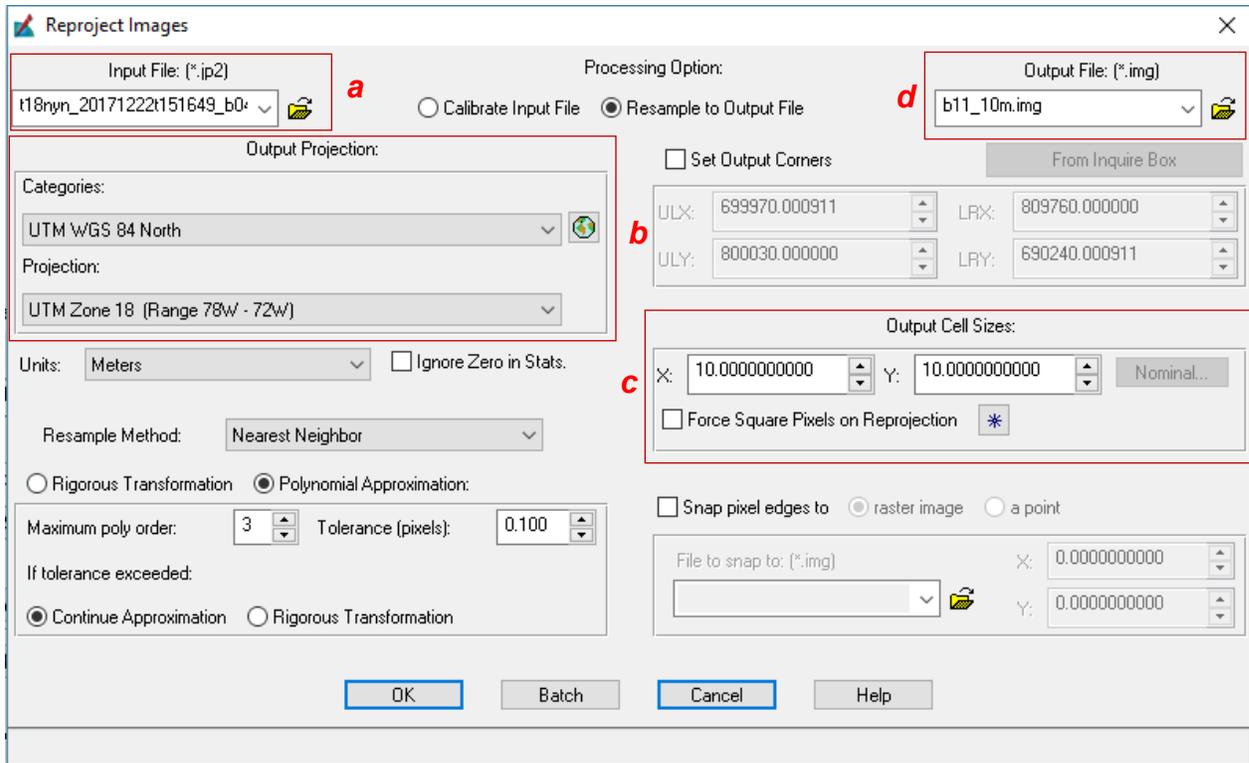


## 11.2. Anexo 2: Metodología Remuestreo (ERDAS)

- *Pestaña Raster – Reproject:*

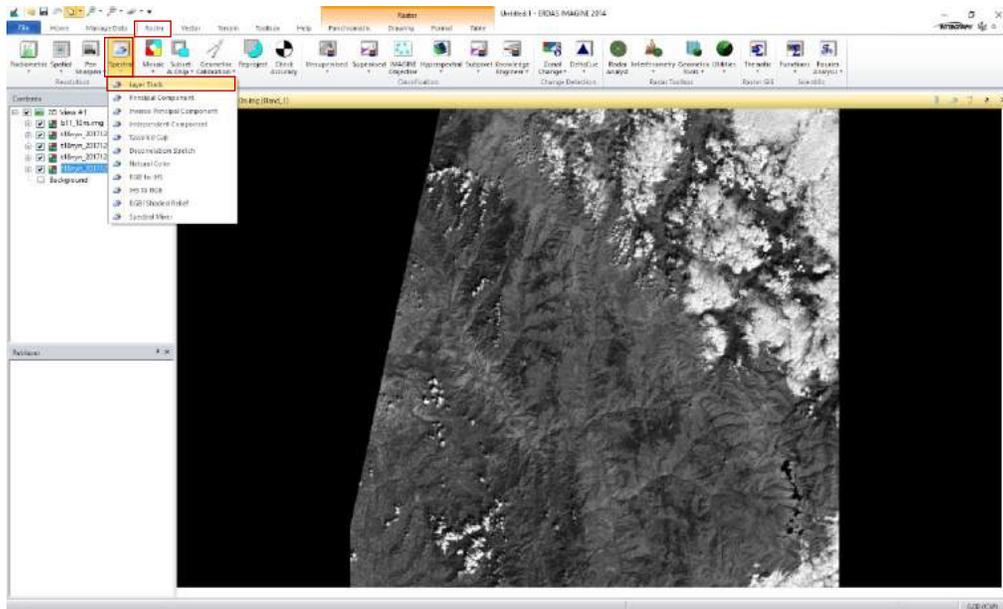


- Ya en la ventana *Reproject Images* se procede a configurar las diferentes opciones que ofrece, entre ellas la proyección de salida (*Output Projection*) y el tamaño de pixel de salida (*Output Cell Size*).
  - a. Primero que todo se elige la banda a remuestrear (b11) en *Input File*.
  - b. En *Output Projection* en la sección *Categorices* seleccionamos de la lista desplegable el sistema de coordenadas con la que trabajaremos la cual es **UTM WGS 84 North** y en *Projection* elegimos **UTM Zone 18 (Range 78W – 72W)** la cual se maneja generalmente para Colombia.
  - c. Una vez configurado el sistema de coordenadas nos dirigimos a la sección *Output Cell Size* donde cambiaremos el tamaño de pixel de la imagen de 20 mt a 10 mt.
  - d. Ya en la sección *Output File* procedemos a guardar la imagen raster remuestreada, finalizamos en Ok y cargamos la imagen resultante.



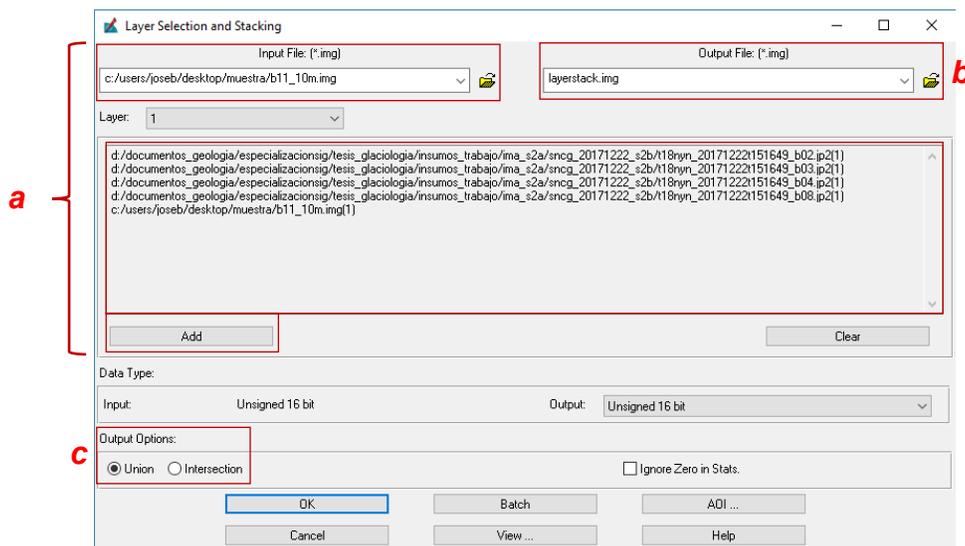
### 11.3. Anexo 3: Metodología Layer Stack (ERDAS)

- *Raster – Spectral – Layer Stack:*

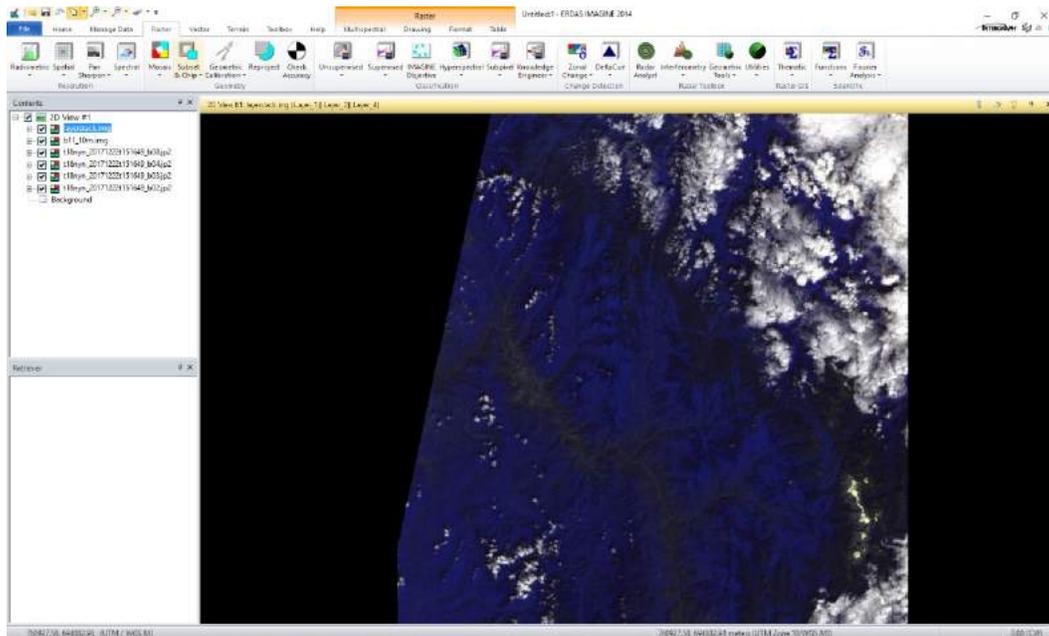


Una vez utilizada esta herramienta se abre una ventana emergente donde se pueden cargar las imágenes o bandas para formar la imagen multibanda, para esto se debe seguir el siguiente procedimiento:

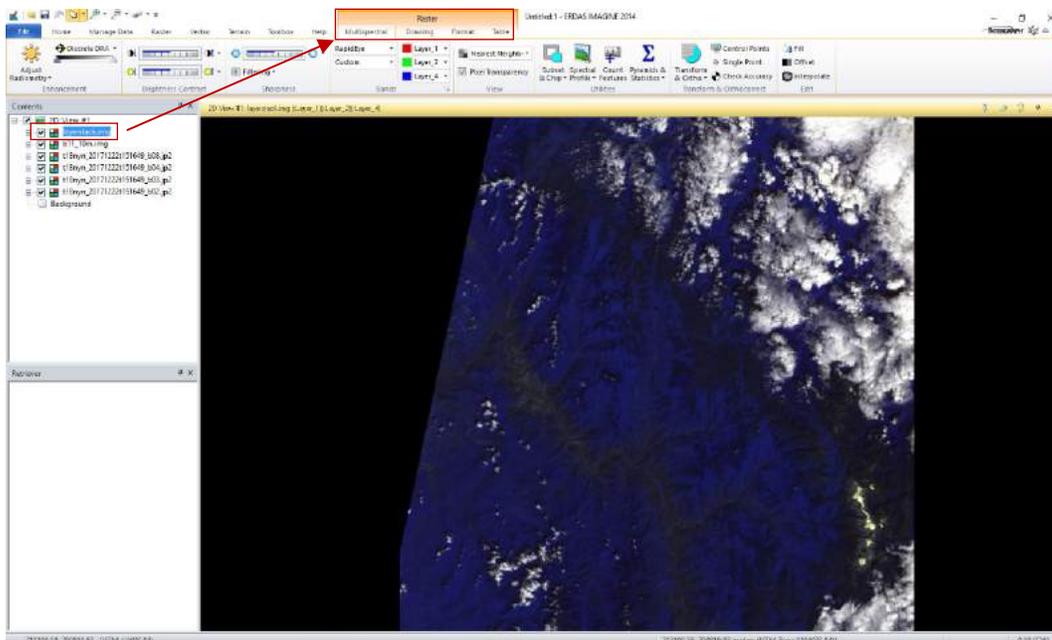
- En la ventana *Layer Selection and Stacking* en la sección *Input File* adicionamos las bandas una por una de menor a mayor. Nota: Recuerde que para este paso se cargara la banda 11 remuestreada.
- En *Output File* elegimos la ruta de guardado.
- En la sección *Output Options* elegimos la opción *Union* y por último Ok.



Una vez hecho lo anterior cargamos la imagen multibanda resultante la cual se visualizará de esta forma:

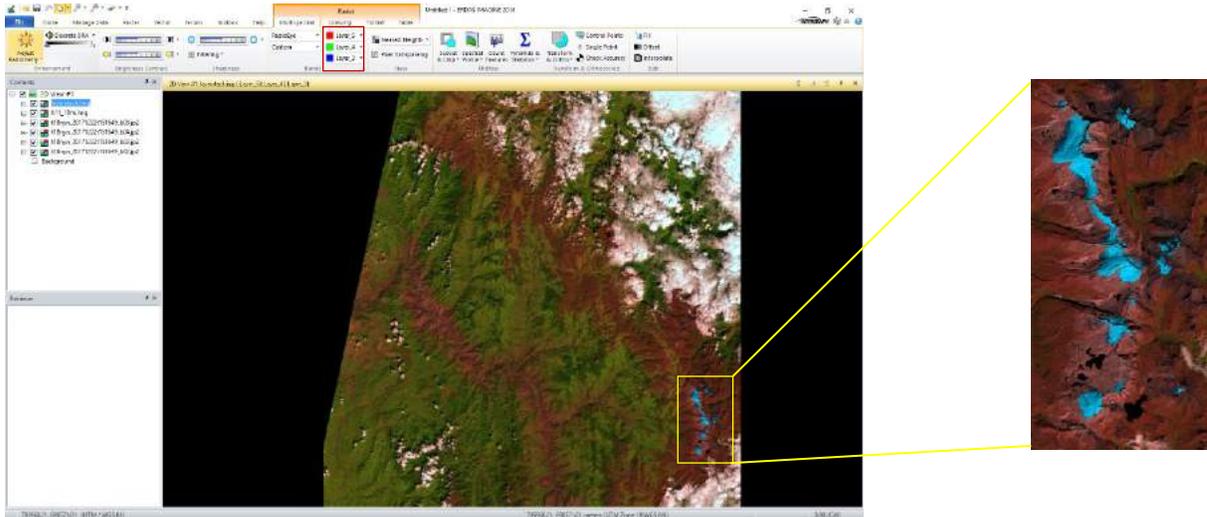


Ya cargado el raster en la sección *Contents* donde se encuentran las capas, seleccionamos el raster multibanda y se podrá observar que se activan las opciones de edición para este raster como se muestra a continuación:

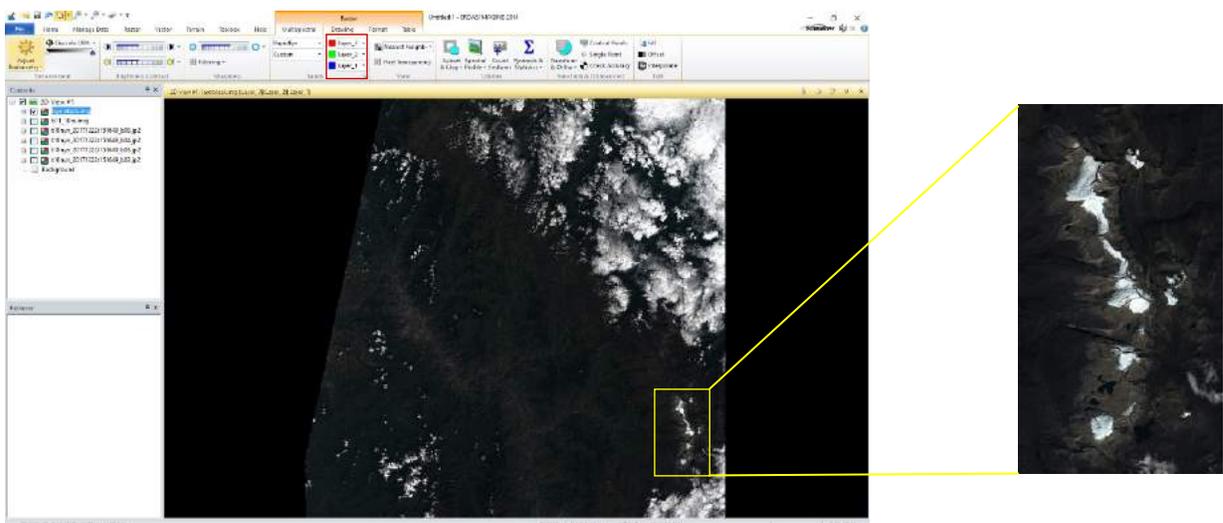


En estas opciones de edición en la pestaña *Multispectral* se procederá a hacer la combinación de bandas para la posterior visualización de la imagen, para este caso se realizará una combinación de bandas para visualizar las superficies glaciares y una combinación para visualizar la imagen en color verdadero:

- Combinación para visualizar superficies glaciares:



- Combinación para visualizar imagen en color verdadero:



Nota: Al momento de generar el raster multibanda el software ERDAS combina las bandas ya no con la denominación b2-b3-b4-b8-b11 si no con la denominación Layer\_1-Layer\_2-Layer\_3-Layer\_4-Layer\_5 respectivamente (Tabla 11).

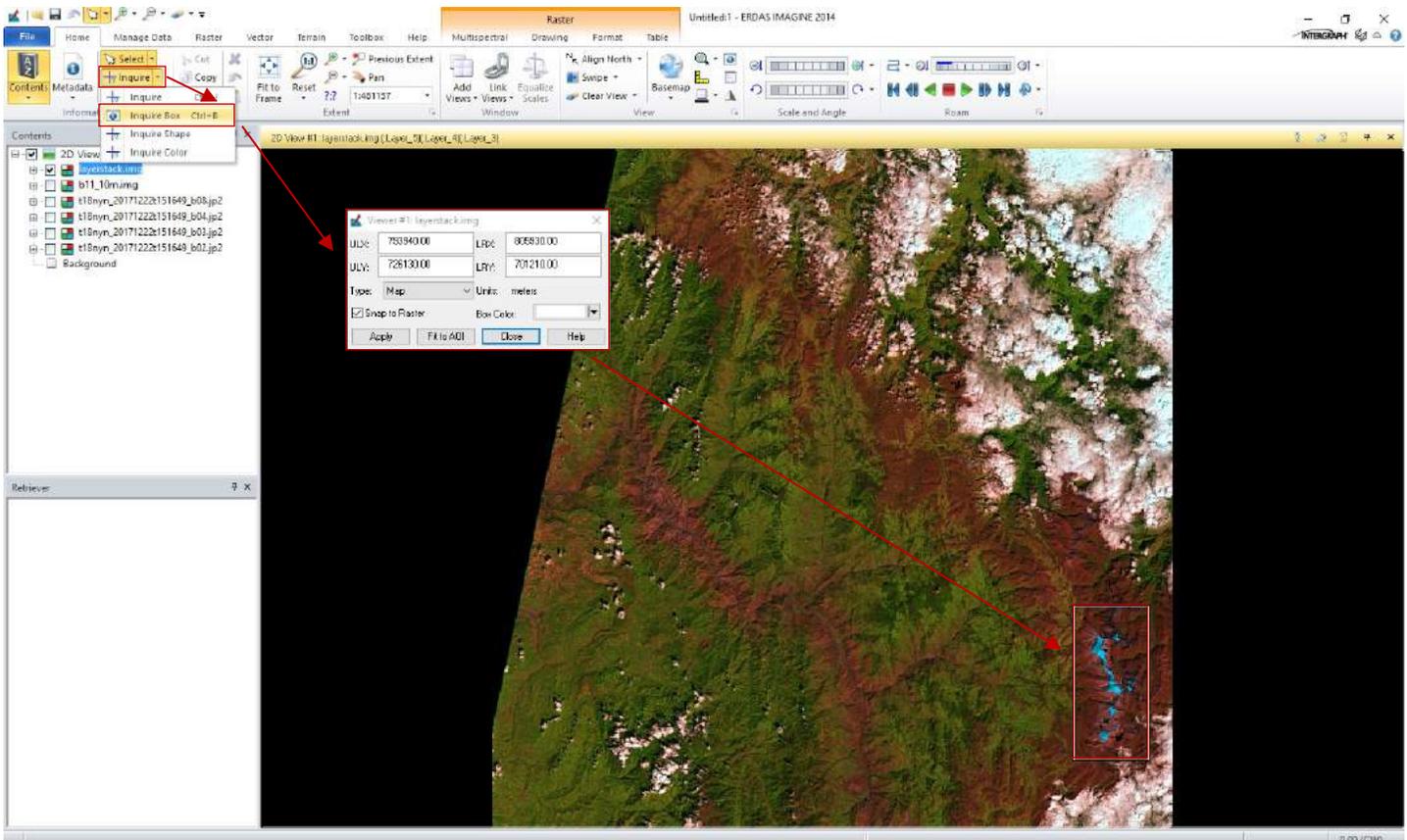
<b>Bandas Sentinel 2</b>	<b>Layer Stack ERDAS</b>
B2	Layer_1
B3	Layer_2
B4	Layer_3
B8	Layer_4
B11	Layer_5

Tabla 38: Relación bandas por separado y el layer stack multibanda

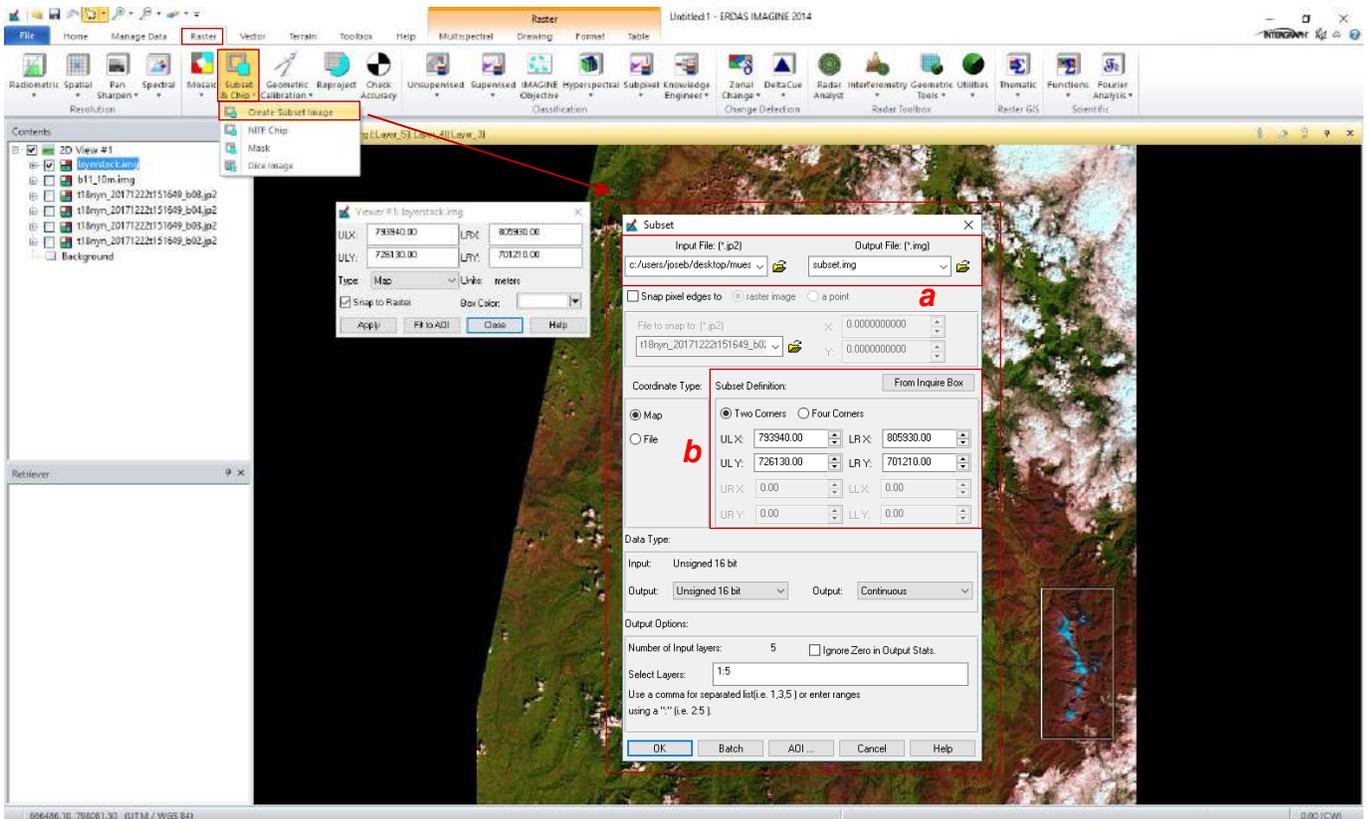
En estas opciones de edición también se puede encontrar herramientas para el mejoramiento visual de la imagen como aplicación de filtros, cambio del contraste, de la nitidez, etc.

## 11.4. Anexo 4: Metodología Delimitación Zona de Interés (ERDAS)

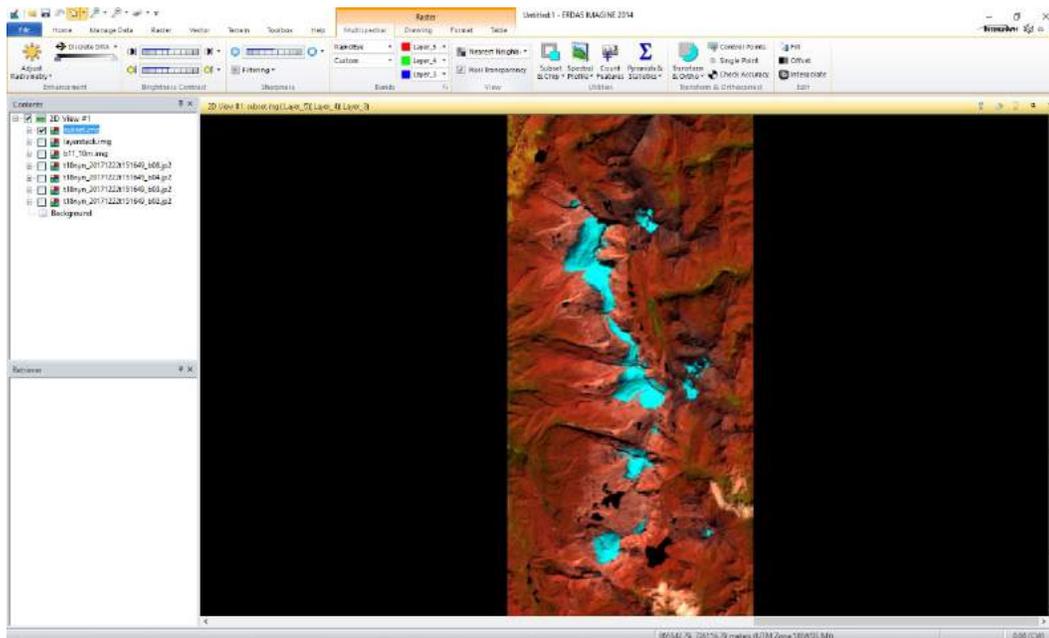
- Con la herramienta *Inquire Box* se delimita la zona de interés.



- Ya delimitada la zona de estudio se procede a recortar la zona. En la pestaña *Raster* vamos a *Subset & Chip* y seleccionamos *Create Subset Image*, se abre la ventana de la herramienta.
  - a. En esta ventana en la sección *Input File* seleccionamos el raster multibanda que se generó anteriormente. En *Output File* seleccionamos la ubicación donde quedara guardado el recorte de la zona.
  - b. En la sección *Subset Definición* se presentan las coordenadas X, Y de dos esquinas del raster, a continuación, se procederá a cambiar dichas coordenadas por las de la delimitación que generamos anteriormente, para esto se utilizara la herramienta *From Inquire Box*, al hacer click en esta opción se notara que cambian las coordenadas, con este paso ya se define el área de recorte y se finaliza en Ok.

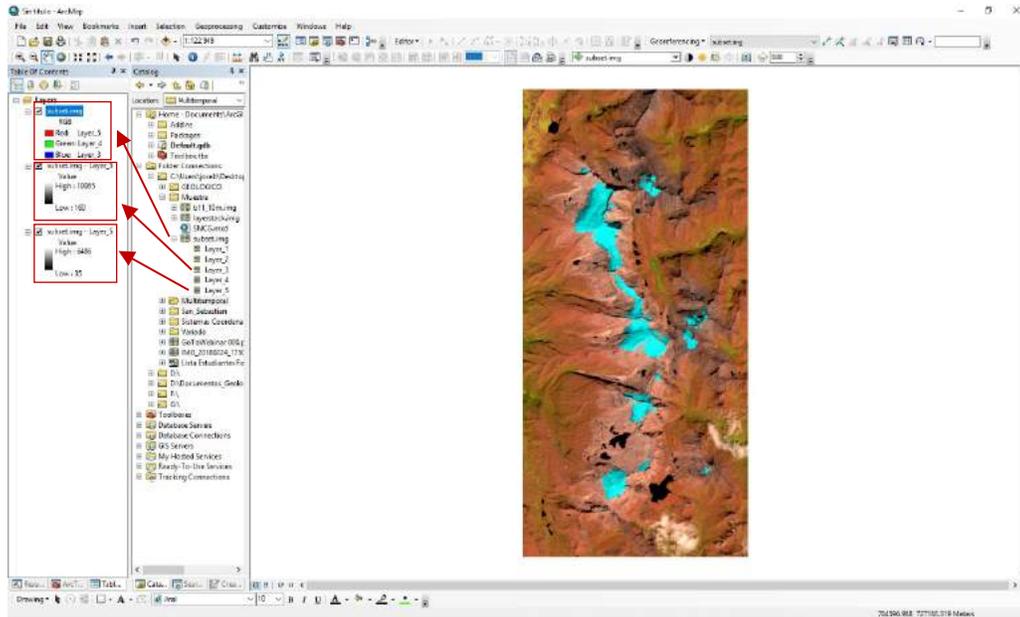


- A continuación, se procede a cargar la zona recortada del raster multibanda:



## 11.5. Anexo 5: Metodología Delimitación y Calculo de Área Glaciar (ArcGIS)

Se procede a cargar el conjunto de layers (raster multibanda) y por separado el Layer\_3 (b4) y el Layer\_5 (b11).

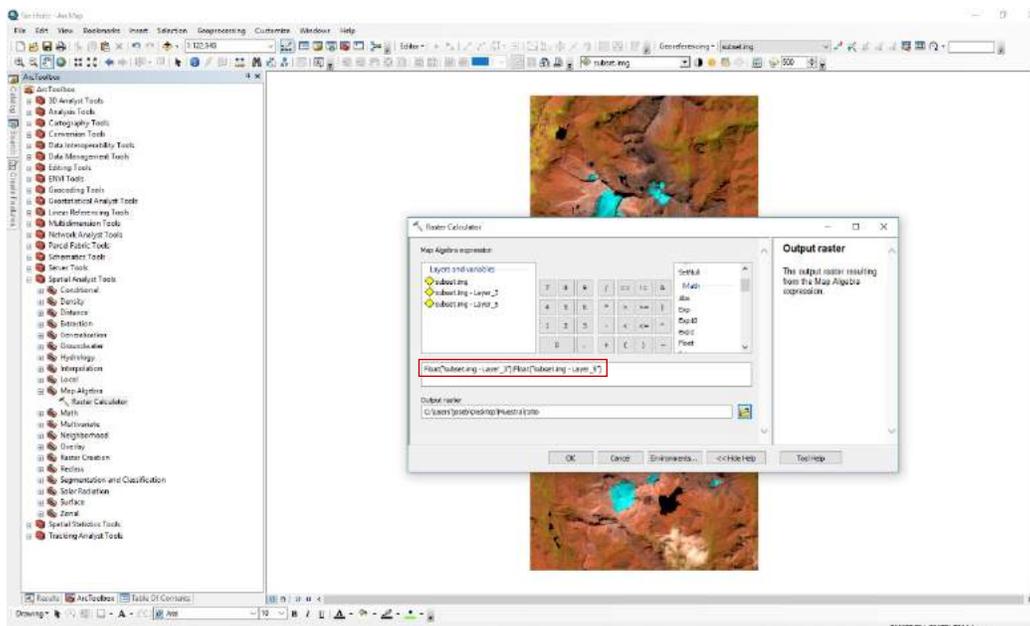


Para la metodología de relación de bandas (band ratio) se utiliza la siguiente formula:

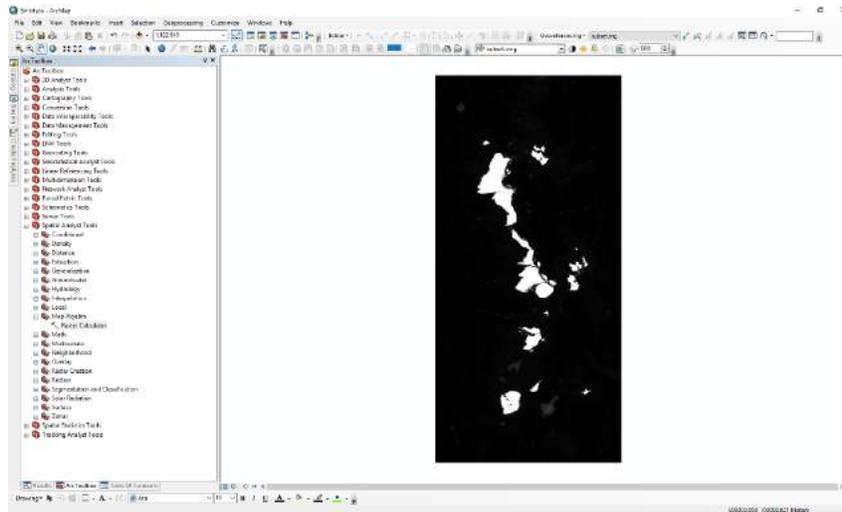
$$\text{Band Ratio} = \frac{\text{Float}(\text{Layer}_3)}{\text{Float}(\text{Layer}_5)}$$

En el software ArcGis se procede a utilizar la herramienta *Raster Calculator*:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator:*

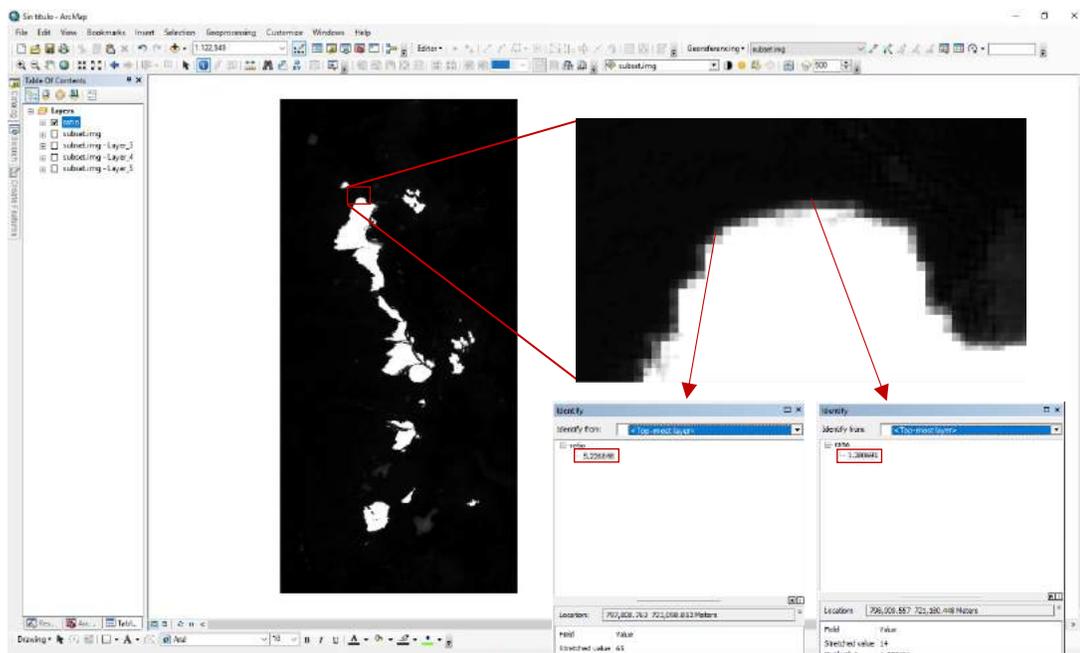


Una vez aplicada la herramienta el resultado se observa como un raster en escala de grises de la siguiente manera:



Lo que se observa en color blanco es el área glaciaria producto de la diferencia de reflectancia entre ambas bandas (b4 y b11).

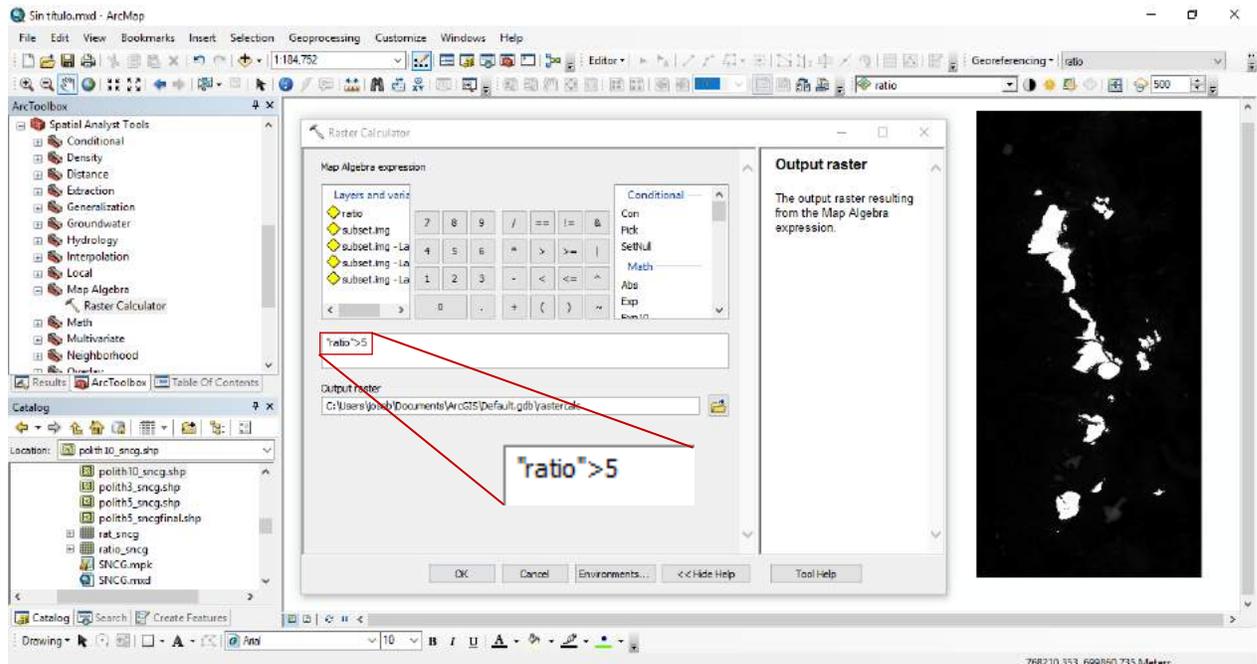
Ahora el procedimiento a seguir es extraer solo esas zonas glaciarias con el fin de determinar el área glaciaria. Para esto se tiene que definir un umbral o *threshold*, el cual consiste en determinar el valor promedio del pixel que define el límite del glaciar, este ítem está muy asociado a la interpretación que el profesional de, para esto se realiza una inspección minuciosa en todo el borde del glaciar donde limita los pixeles de tonalidades blancas con las de tonalidades oscuras, mediante la herramienta *Identify* de ArcGis se puede determinar el valor del pixel haciendo click sobre este, como se observa a continuación:



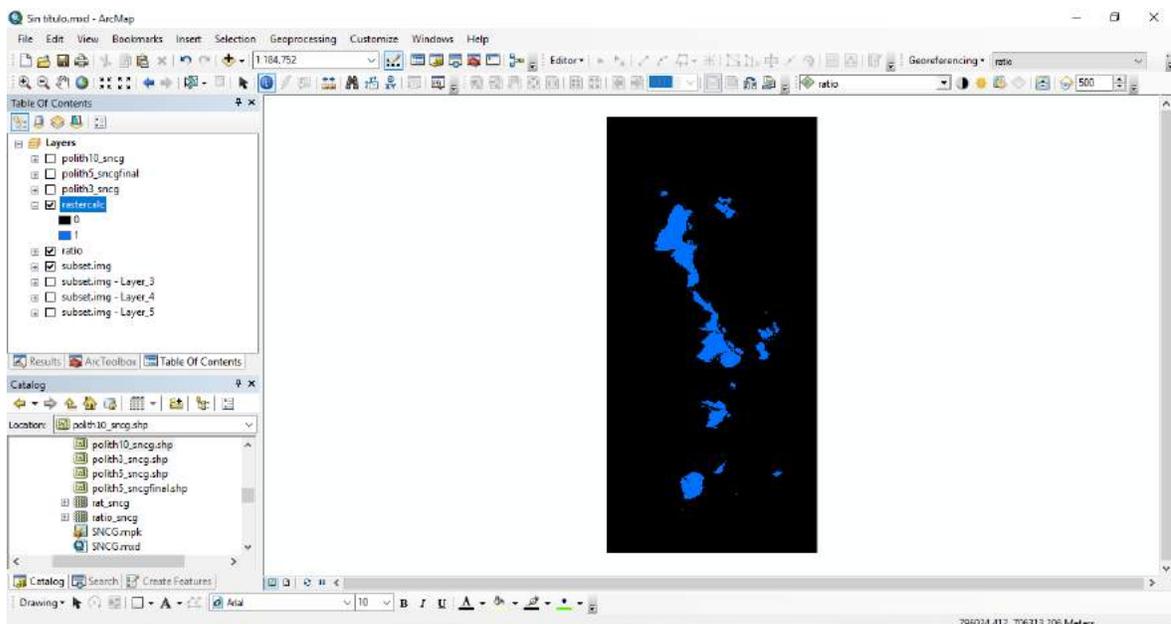
Para una mejor interpretación del límite glacial, es una muy buena opción determinar varios threshold con el fin de comparar y analizar el que mejor se adapte al límite. Una vez determinado el threshold (valor de pixel) se procede a utilizar la herramienta *Raster Calculator* para asignarle un valor a los pixeles que posean un valor inferior al threshold previamente identificado:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator*

Se utiliza la siguiente expresión para asignar un valor a todos los pixeles mayores al threshold: **“Ratio” > x**, donde **Ratio** es el producto de la relación de las bandas b4 y b11 y **x** es el valor del threshold asignado.

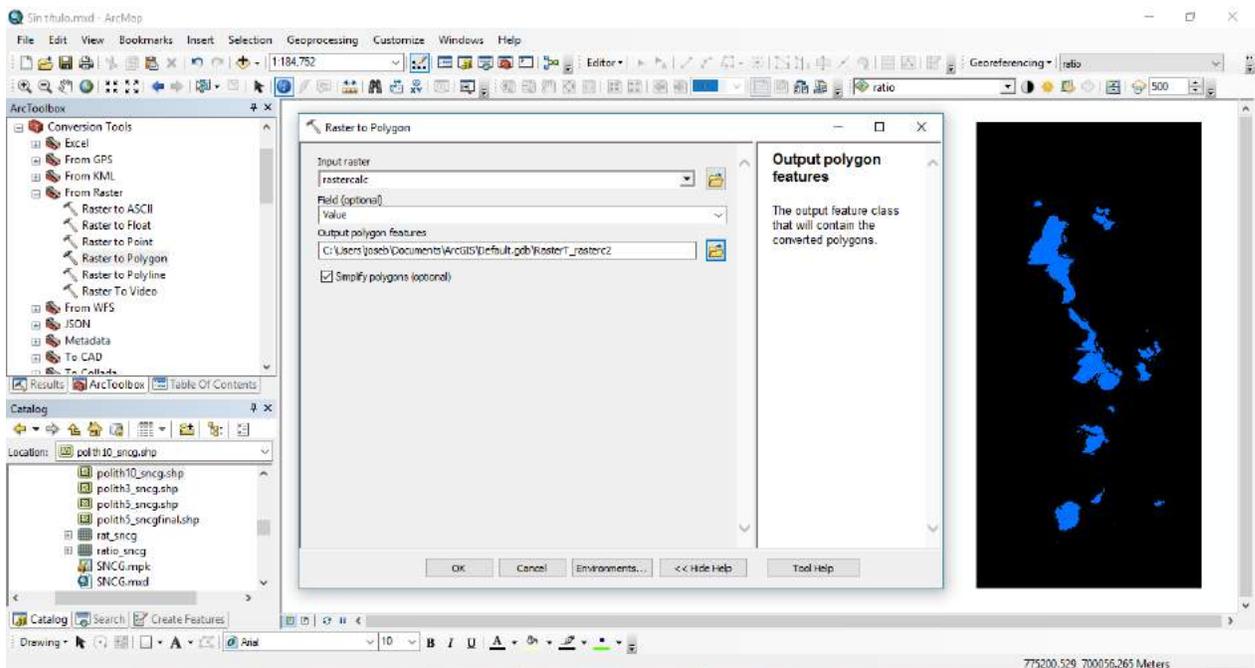


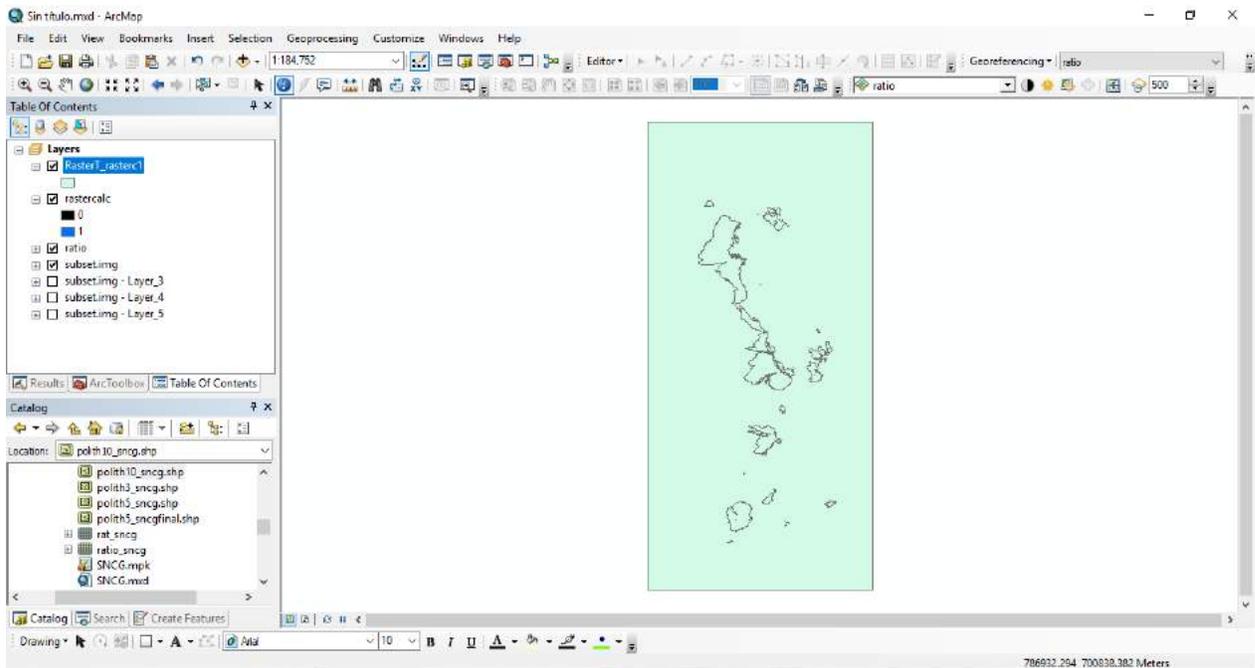
Una vez aplicada la herramienta se obtiene el siguiente resultado:



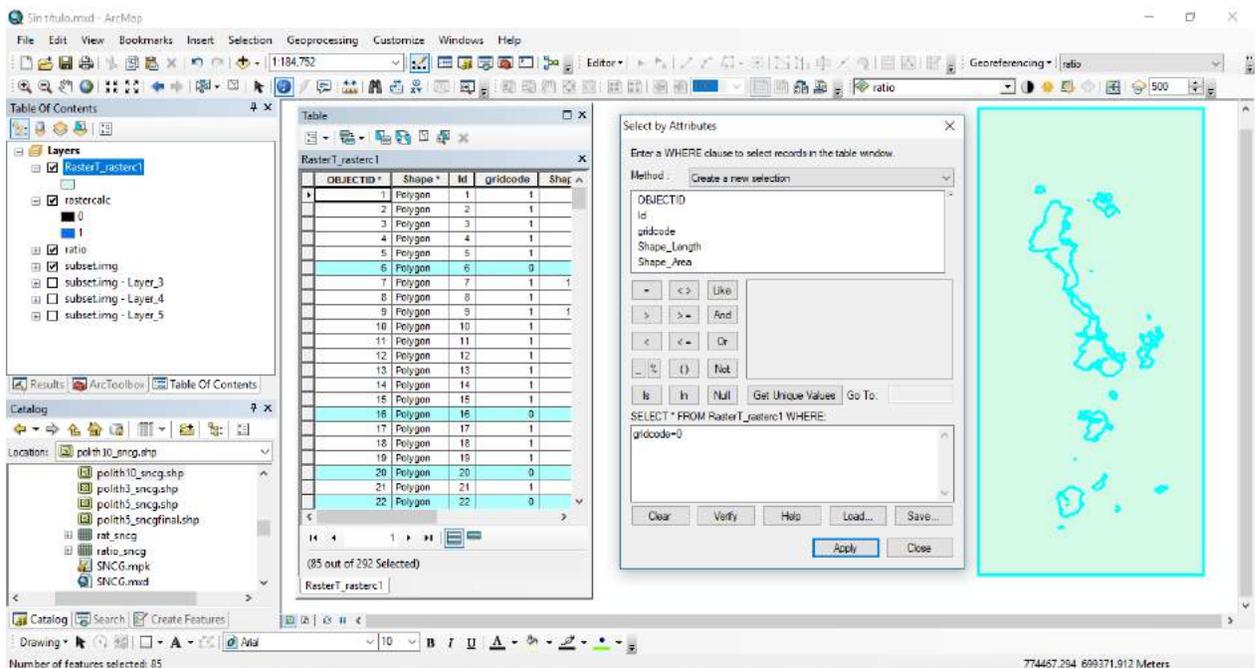
Se observa una imagen raster con dos colores, la zona de color negro hace referencia a los valores de pixel menor al threshold y la zona de color azul hace referencia a los valores de pixel mayores al threshold por lo que es la zona de área glaciar interpretada por el profesional y el software. Aquí el software asigna un valor 0 para la zona de color negro y un 1 para la zona de color azul, por lo que ahora se procede a convertir este raster a polígono con la herramienta Raster to Polygon:

- *Arctoolbox – Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon.*

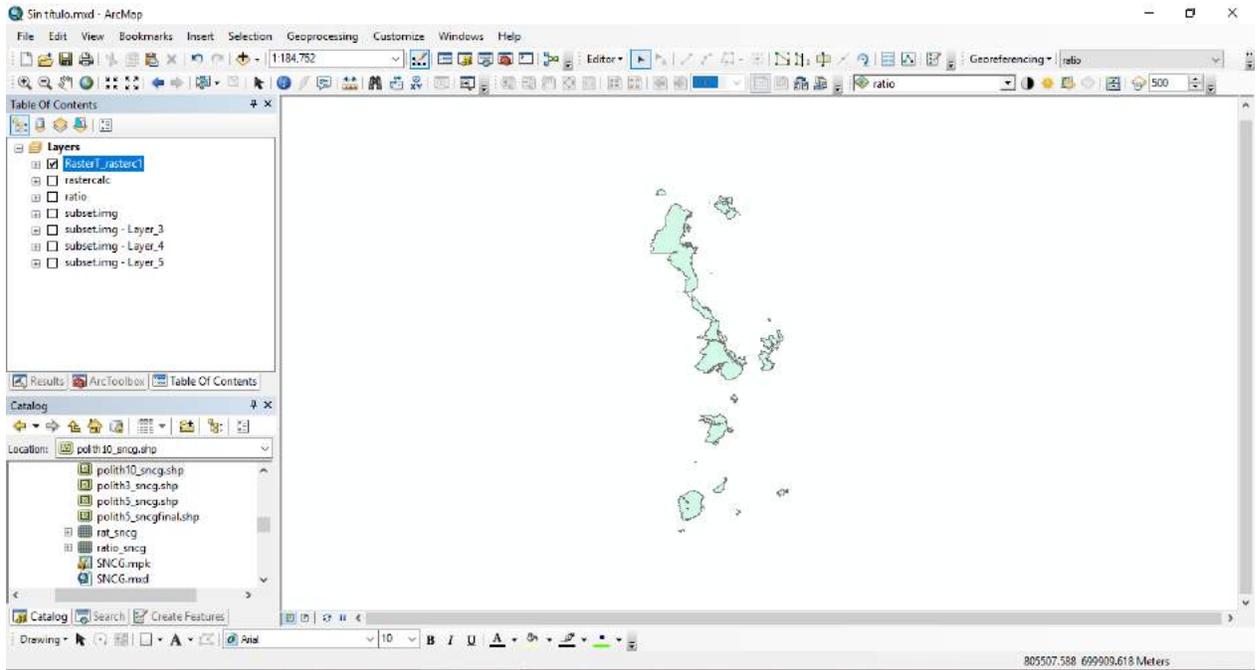




Ya convertido el raster a polígono procedemos a eliminar la zona que no pertenece al área glaciar, para esto vamos a la tabla de atributos del shape y con la herramienta seleccionar por atributos, se selecciona el campo gridcode el cual está compuesto de valores de 0 y 1 e indicamos que seleccione los valores igual a 0 y se procede a eliminar estos valores.



Resultado:

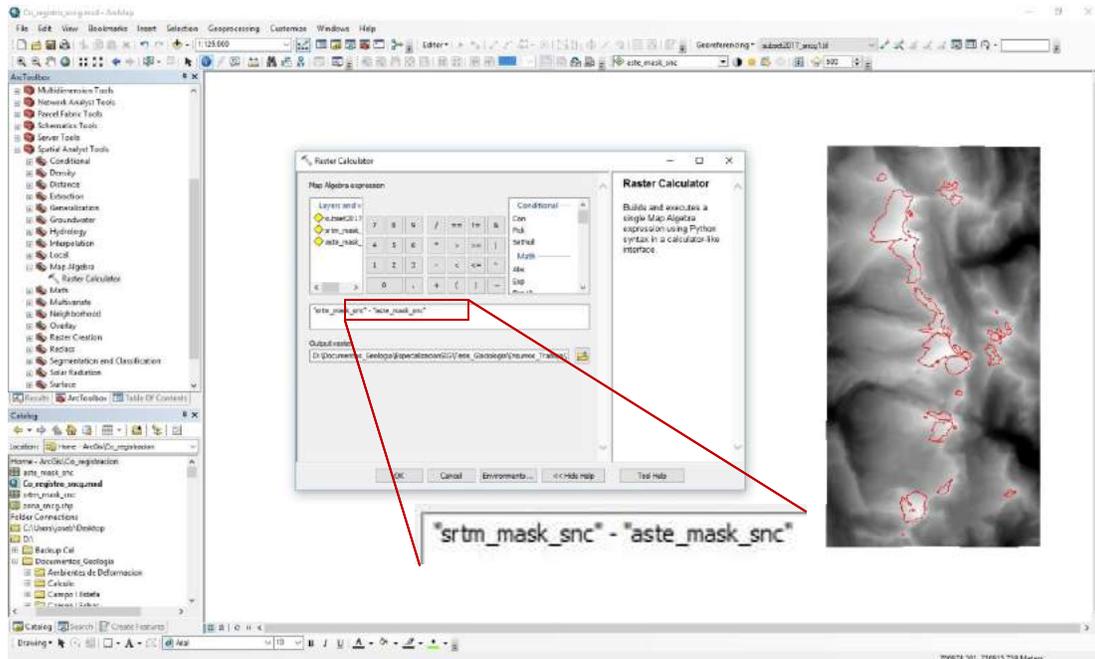


## 11.6. Anexo 6: Metodología Co-Registración MDT

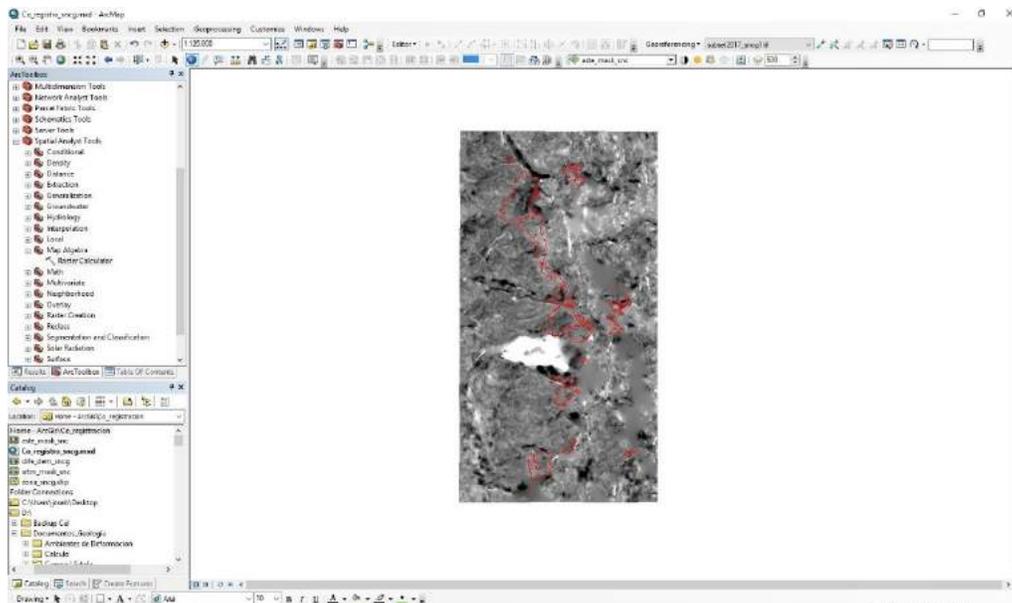
Para esta metodología se utilizará el software ArcGIS 10.3, en un nuevo proyecto agregaremos los DEM ASTER GDEM v2 y SRTM v3, una vez hecho esto se procede a calcular la diferencia entre ambos DEM por medio de la herramienta *Raster Calculator*.

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator.*

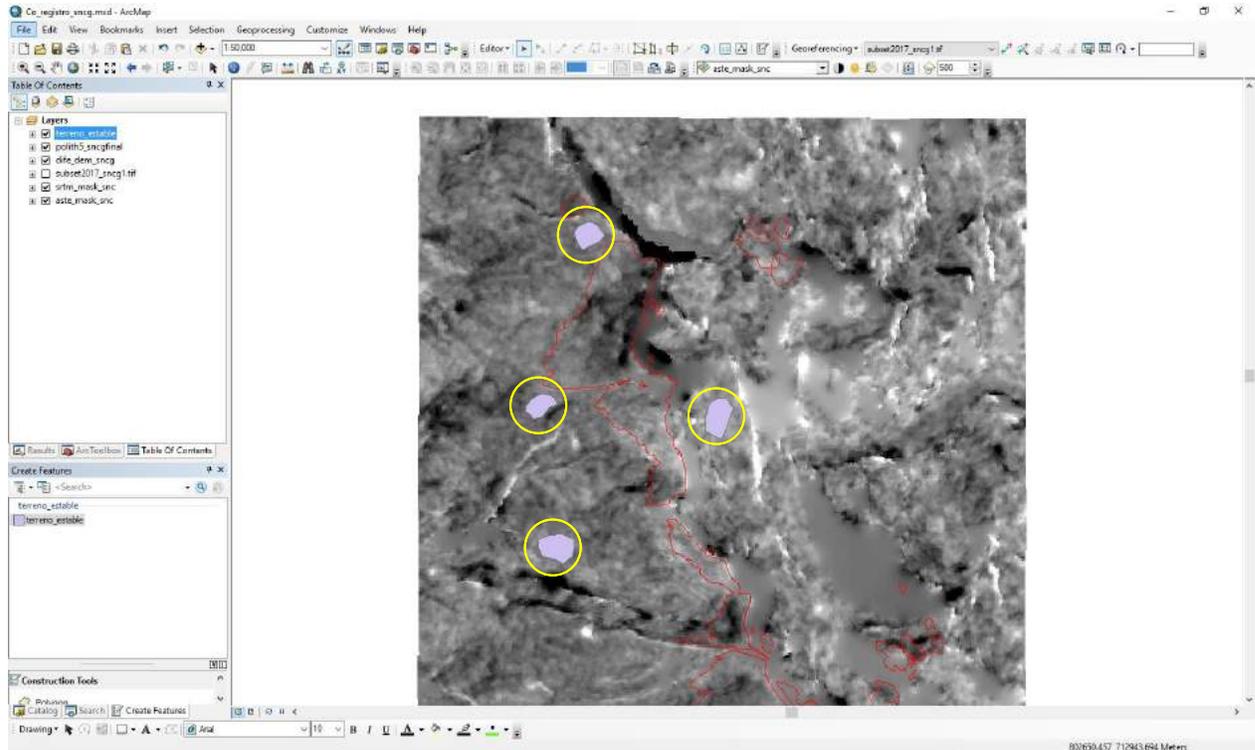
Ya en la herramienta, procedemos a ingresar la expresión “*DEM\_SRTM*” – “*DEM\_ASTER*”:



El resultado de esta diferencia genera un mapa de sombras o hillshade, interpretándose como un cambio (dh) de elevación entre ambos DEM para la fecha de adquisición:

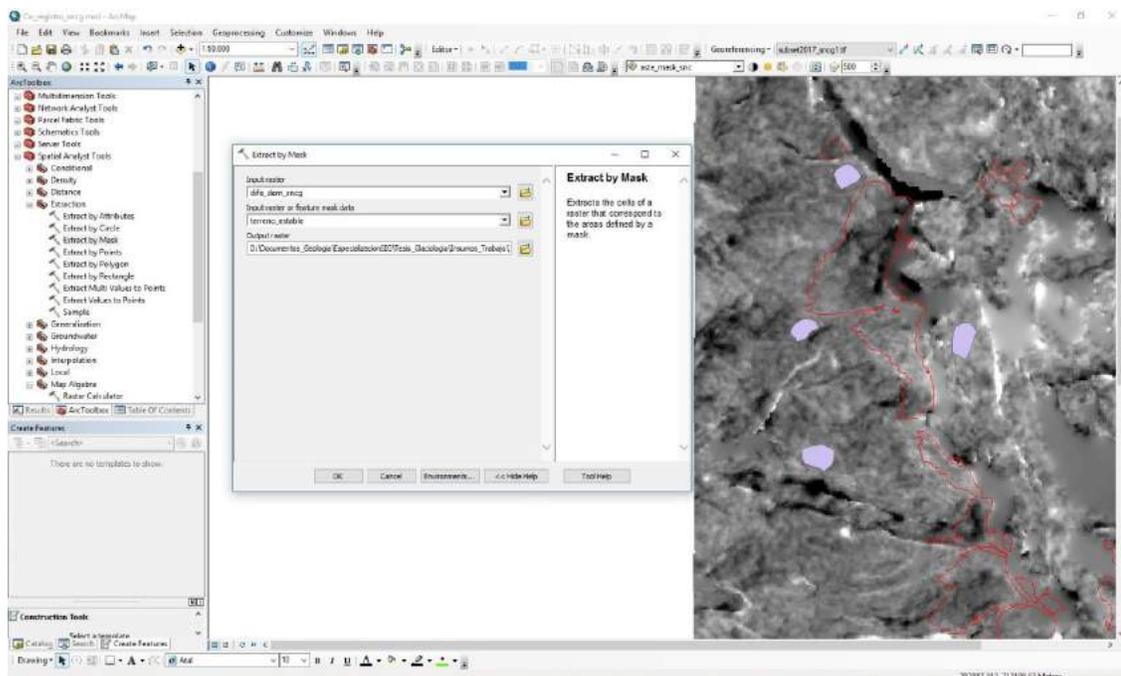


Ahora, una vez generada la diferencia se procede digitalizar polígonos en zonas o terrenos estables (círculos de color amarillo) del DEM que no posean área glaciar, esto con el fin de obtener más adelante valores de diferencia de altura en dichas zonas:

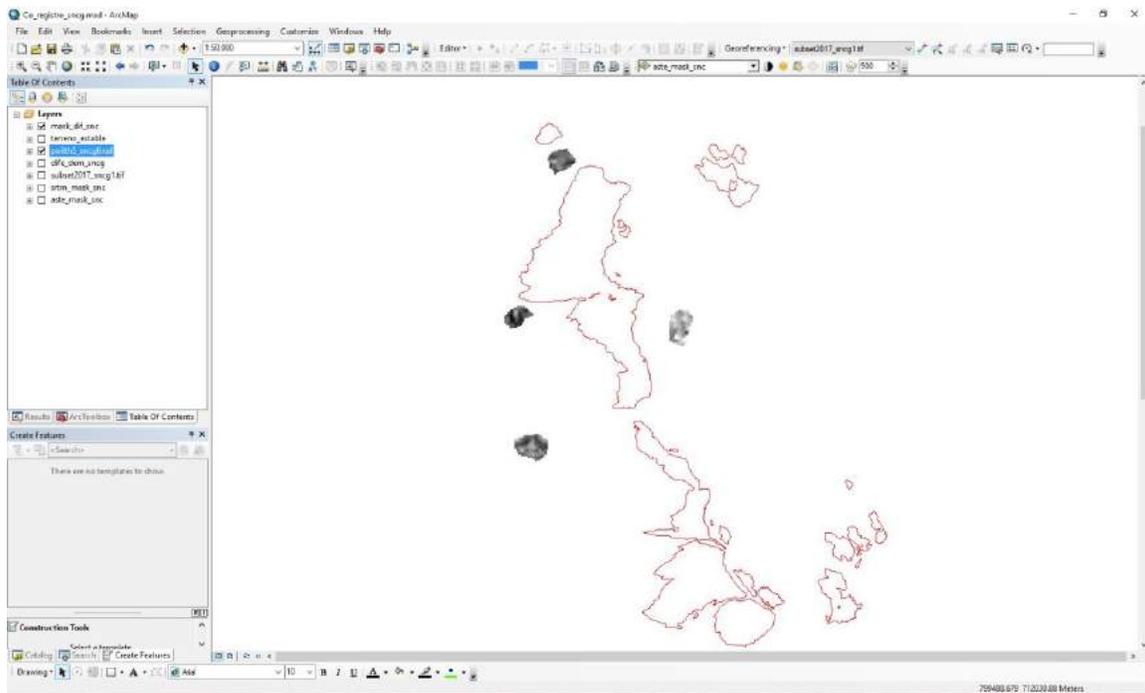


A partir de los polígonos de terreno estable se utiliza la herramienta *Extract by Mask*, realizando un recorte o subset de cada zona estable con respecto al archivo de diferencia (hillshade):

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Extraction – Extract by Mask*

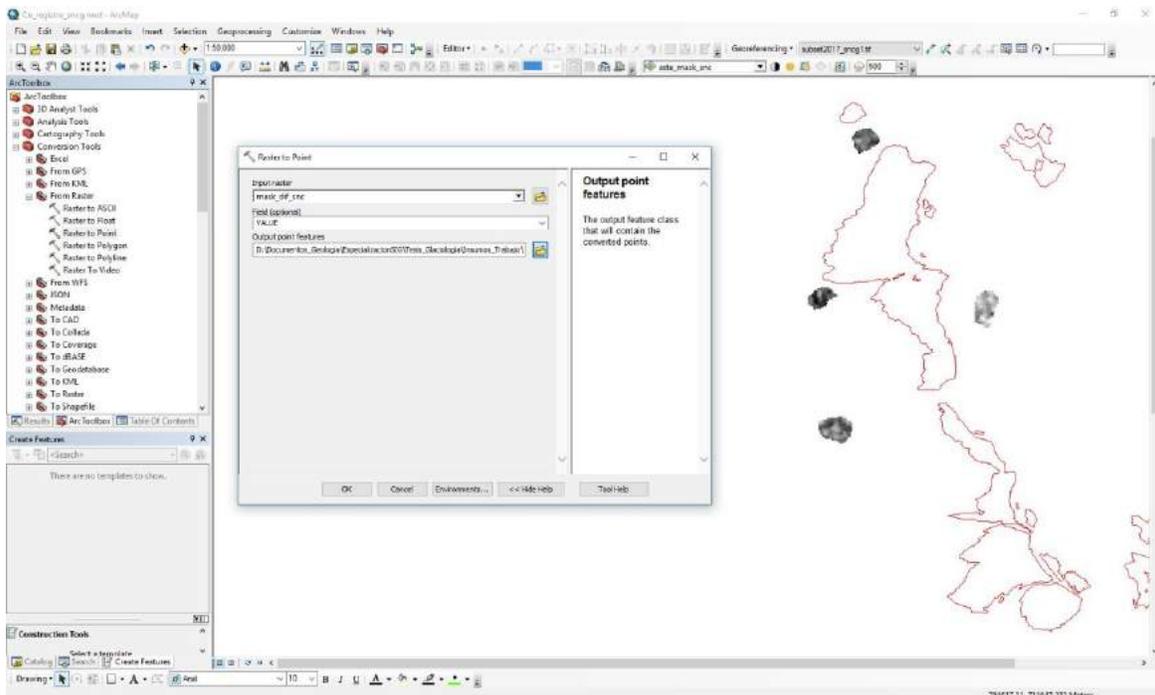


Resultado:

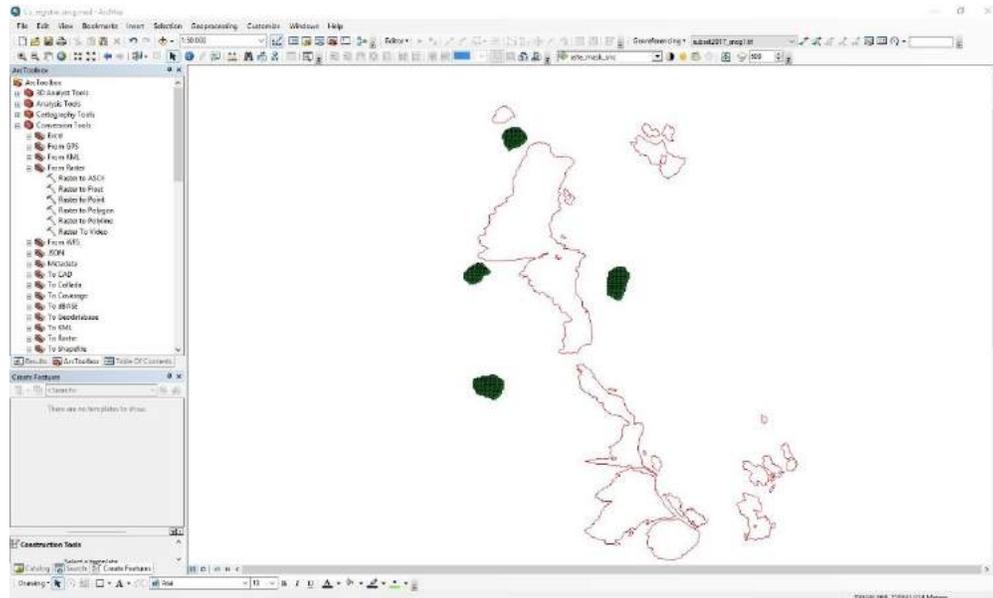


Una vez generados estos recortes, se procede a convertir esas zonas estables en formato raster a shape de puntos con la herramienta *Raster to Point*:

- *Arctoolbox – Conversion Tools – From Raster – Raster to Point*



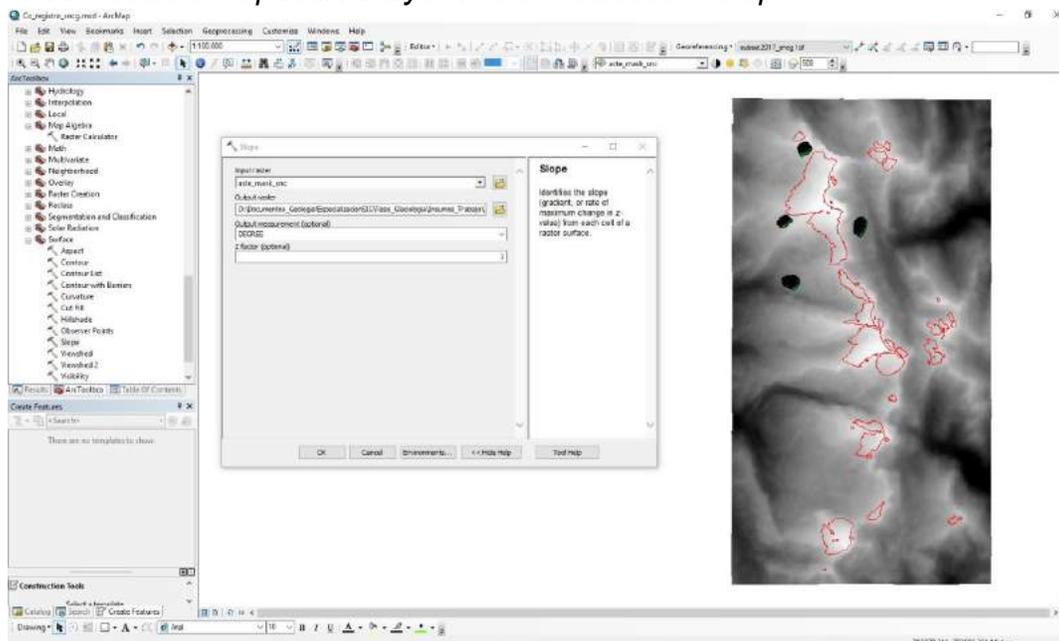
Resultado:



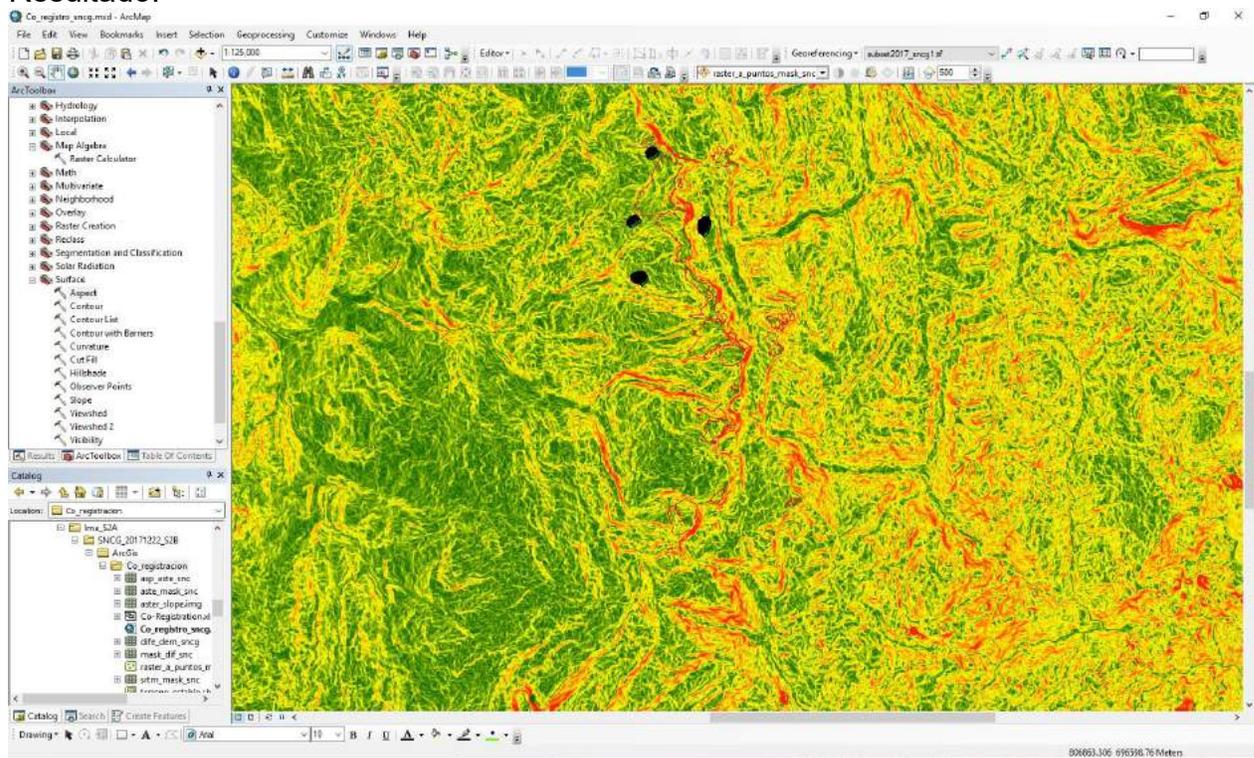
Este procedimiento genera un shape de puntos y cada punto generado pertenece a un pixel del raster recortado (diferencia hillshade), cada punto obtendrá un valor el cual pertenece al pixel del raster, estos valores pueden ser negativos (-) o positivos (+), esto asociado a la diferencia de elevación de los DEM (ASTER y SRTM), esta diferencia de elevación se denomina  $\Delta h$  o  $dh$ .

El siguiente paso es calcular las pendientes (*slope*) y el aspecto (*aspect*) u orientación de la pendiente a partir del DEM ASTER:

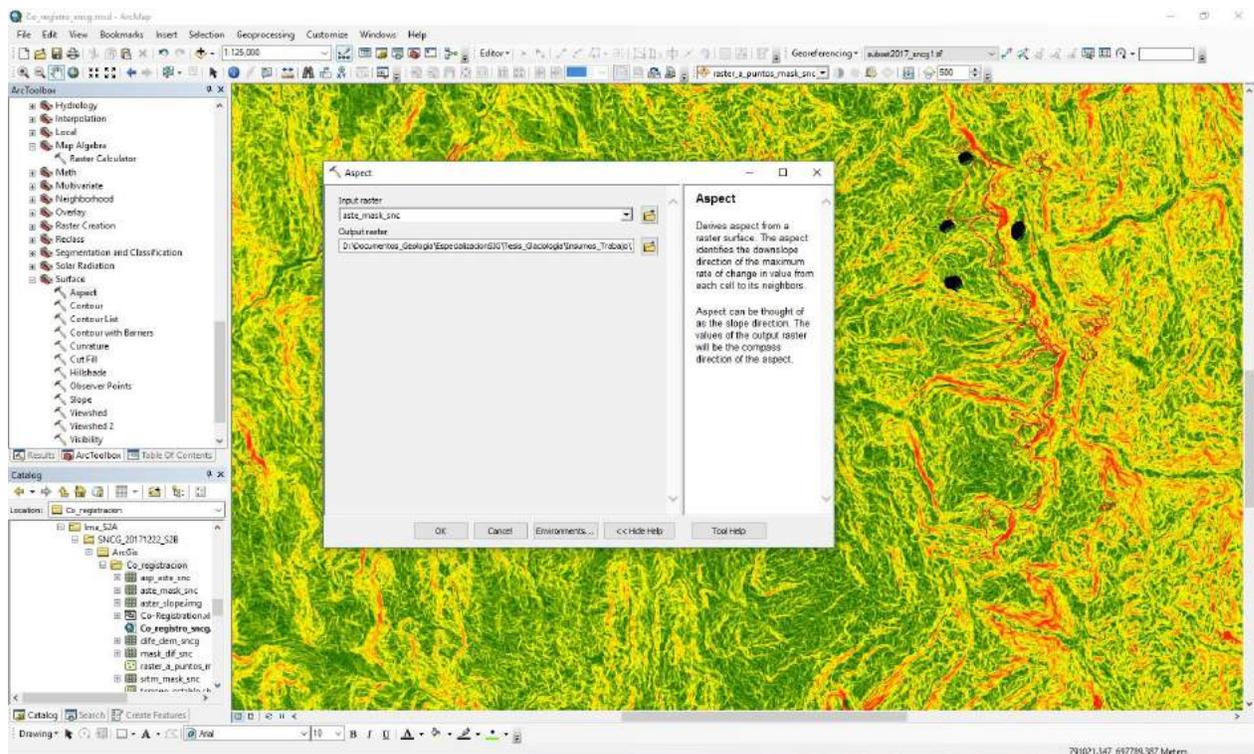
- **Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Surface – Slope**



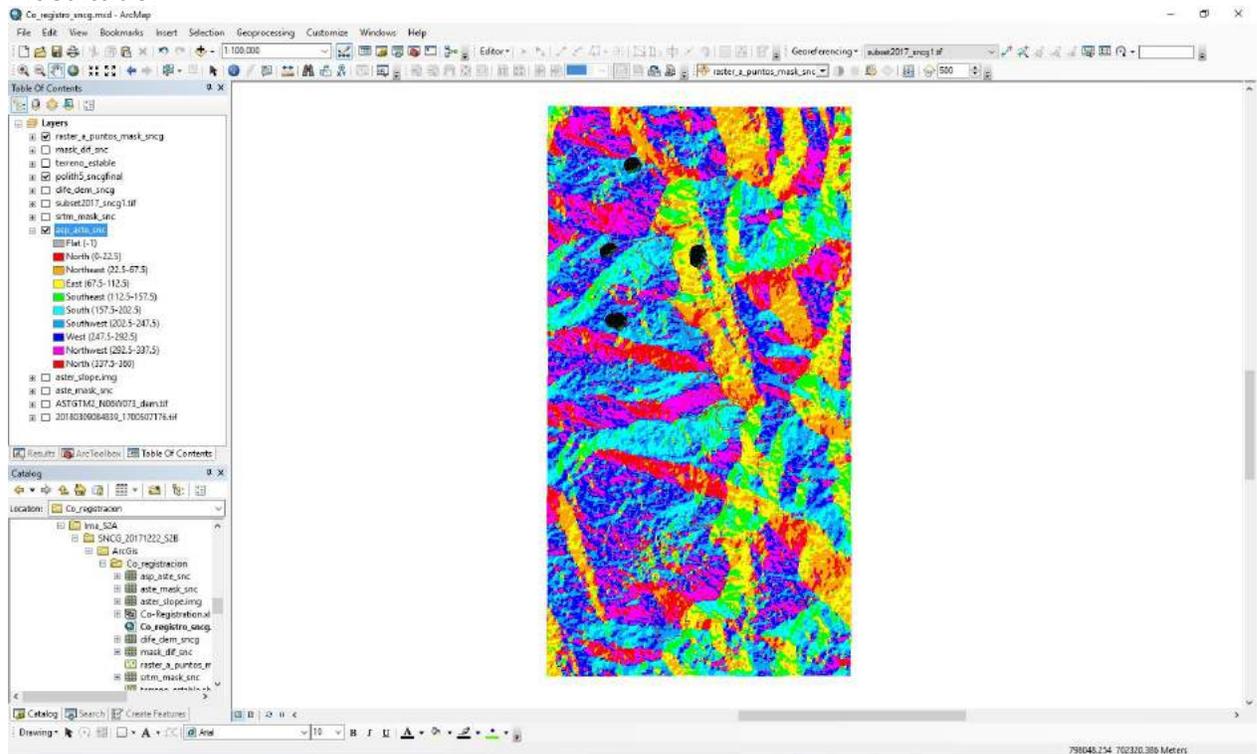
## Resultado:



- *ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Surface – Aspect*

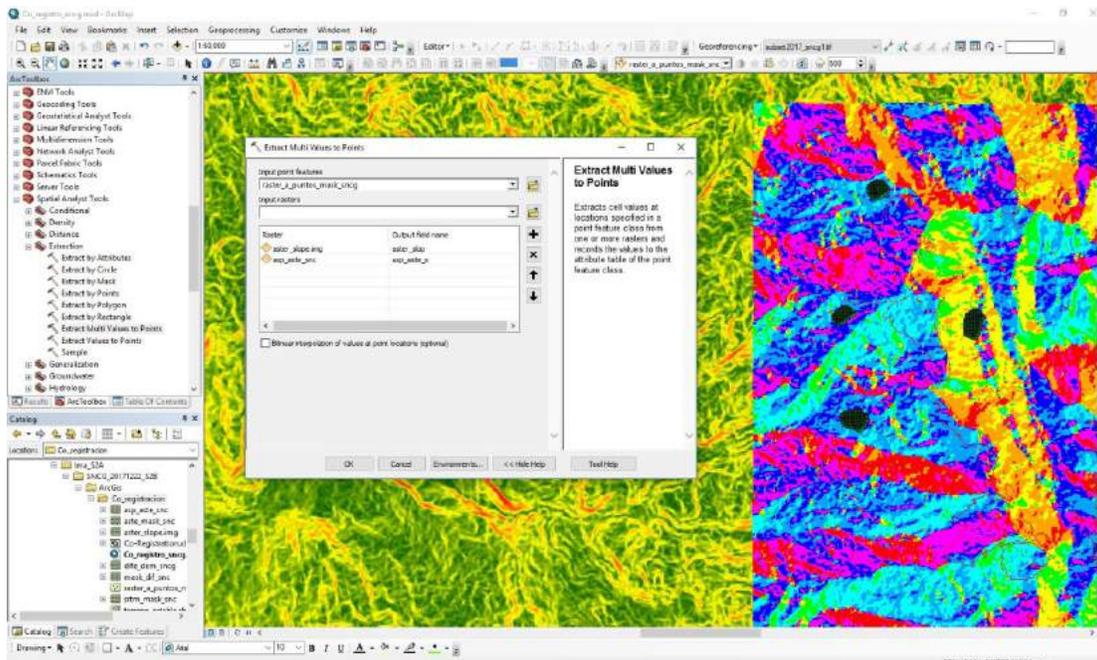


## Resultado:



A partir de estos dos raster procedemos a extraer valores de pendientes y aspecto por medio del shape de puntos generado anteriormente con la herramienta *Extract Multivalues to Point*:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Extraction – Extract Multivalues to Point*



Esta herramienta lo que genera son valores de pendientes y aspecto (orientación) para cada punto como se puede observar en la tabla de atributos del shape puntos:

Table

Δh o dh      Pendientes      Aspecto

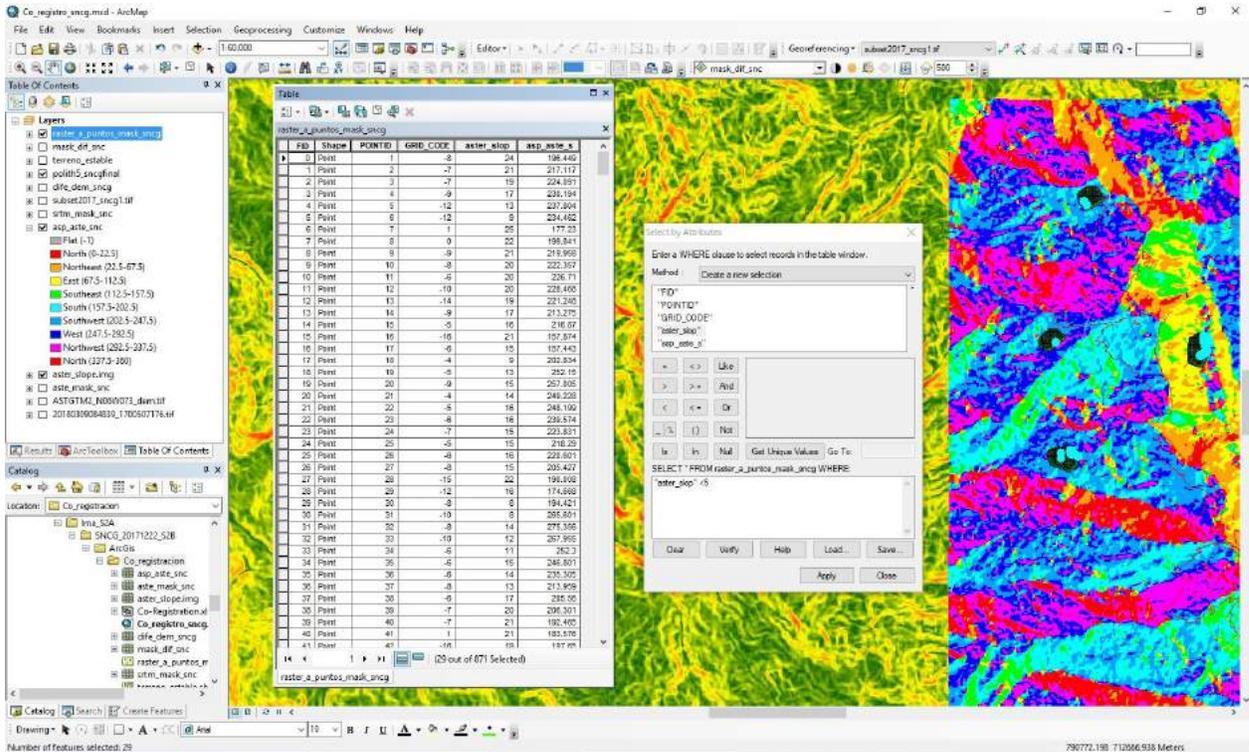
raster\_a\_puntos\_mask\_sncg

FID	Shape	POINTID	GRID_CODE	aster_slop	asp_aste_s
0	Point	1	-8	24	196.449
1	Point	2	-7	21	217.117
2	Point	3	-7	19	224.091
3	Point	4	-9	17	230.194
4	Point	5	-12	13	237.804
5	Point	6	-12	9	234.462
6	Point	7	1	25	177.23
7	Point	8	0	22	199.841
8	Point	9	-9	21	219.958
9	Point	10	-8	20	222.357
10	Point	11	-6	20	226.71
11	Point	12	-10	20	226.468
12	Point	13	-14	19	221.248
13	Point	14	-9	17	213.275
14	Point	15	-5	16	216.87
15	Point	16	-16	21	157.874
16	Point	17	-6	15	157.443
17	Point	18	-4	9	202.834
18	Point	19	-5	13	252.15
19	Point	20	-9	15	257.005
20	Point	21	-4	14	249.228
21	Point	22	-5	16	248.199
22	Point	23	-6	16	239.574
23	Point	24	-7	15	223.831
24	Point	25	-5	15	218.29
25	Point	26	-6	16	220.601
26	Point	27	-8	15	205.427
27	Point	28	-15	22	190.008
28	Point	29	-12	16	174.668
29	Point	30	-8	8	194.421
30	Point	31	-10	8	265.601
31	Point	32	-8	14	275.356
32	Point	33	-10	12	267.955
33	Point	34	-6	11	252.3
34	Point	35	-6	15	246.801
35	Point	36	-6	14	235.305
36	Point	37	-8	13	213.959
37	Point	38	-6	17	205.56
38	Point	39	-7	20	206.301
39	Point	40	-7	21	192.465
40	Point	41	1	21	183.576
41	Point	42	-16	19	197.65

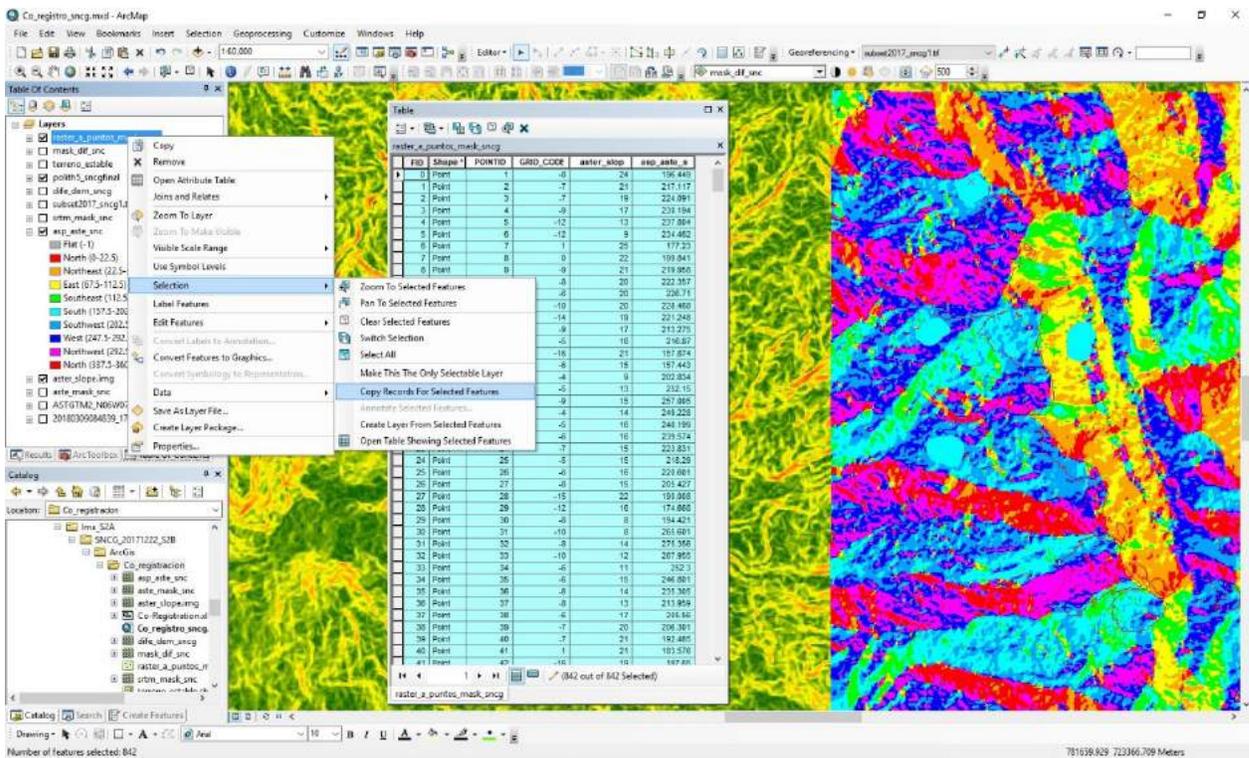
(0 out of 871 Selected)

raster\_a\_puntos\_mask\_sncg

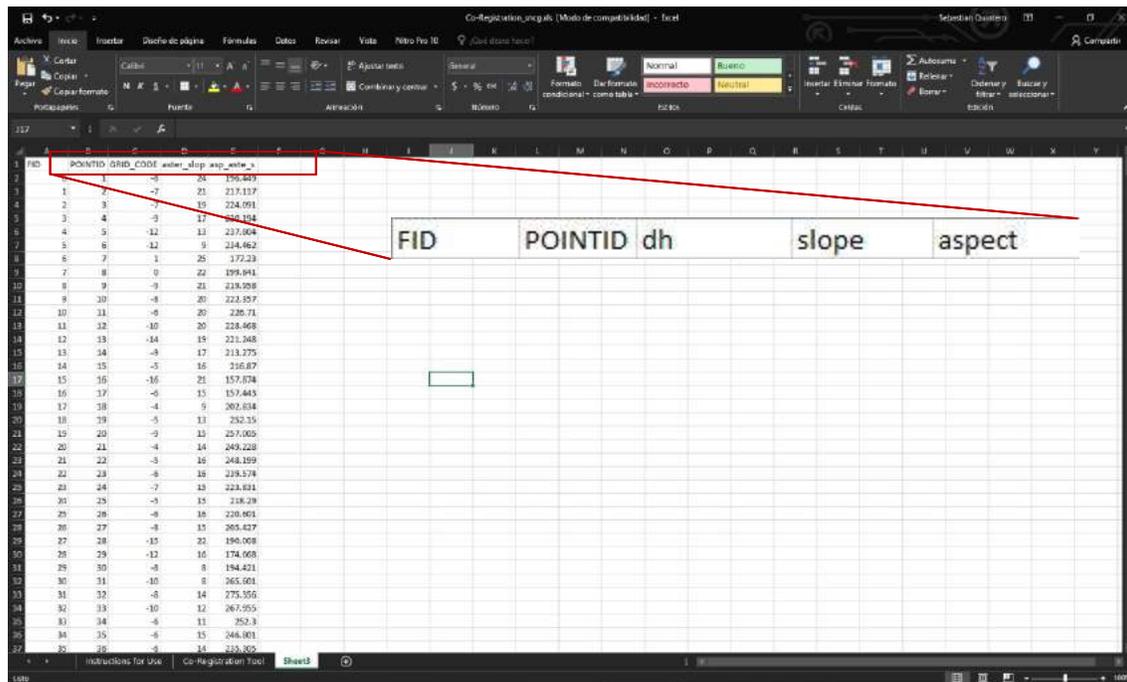
Ahora, se procede a excluir o eliminar del shape de puntos las pendientes menores a 5° ya que estos valores generalmente no presentan diferencias de altura y sesgos tanto horizontales y verticales significativos a la hora de la corrección:



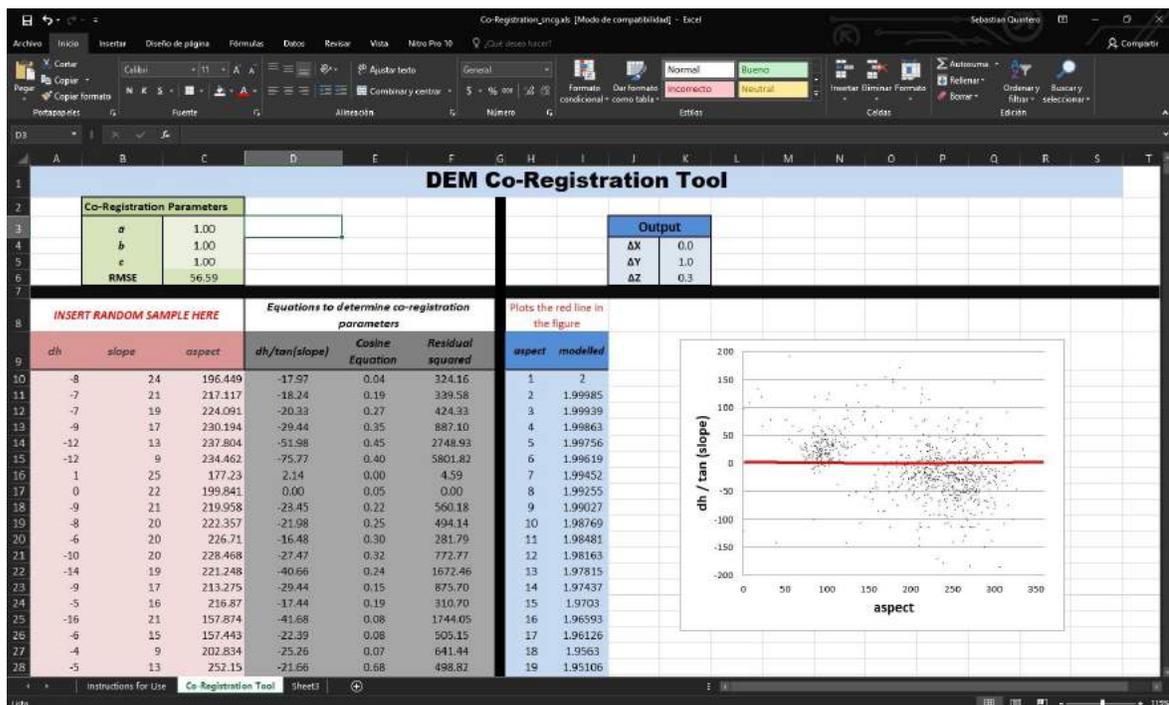
Una vez excluidas las pendientes menores al 5° se procede a seleccionar todos los datos de la tabla de atributos y copiarlos en un archivo Excel:



Copiado de información a Excel y corrección de nombre del título de las columnas:



Estos valores copiados de la tabla de atributos dh, Slope y Aspect, serán consignados en una herramienta excel desarrollada por Nuth y Käab (2011), donde en este excel copilan el algoritmo para la corrección de las cambios de elevación y sesgos de desplazamiento tanto verticales y horizontales, la interfaz del libro excel es muy sencilla y fácil de usar, en la primera hoja presenta las instrucciones de cómo se debe manejar y consignar la información para que el algoritmo funcione correctamente y en la segunda hoja se consignaran los datos según la información obtenida. A continuación, se presenta la interfaz de la herramienta:



Lo primero que se debe hacer en la herramienta es corregir los parámetros de la Co-registración los cuales se denominan a, b y c, los cuales por defecto deben tener un valor el cual es 1:

Co-Registration Parameters	
<i>a</i>	1.00
<i>b</i>	1.00
<i>c</i>	1.00

A continuación, se procede a insertar los valores de dh, slope y aspect en los campos asociados en la herramienta:

FID	POINTID	dh	slope	aspect
0	1	-8	24	196.449
1	2	-7	21	217.117
2	3	-7	19	224.091
3	4	-9	17	230.194
4	5	-12	13	237.804
5	6	-12	9	234.462
6	7	1	25	177.23
7	8	0	22	199.841
8	9	-9	21	219.958
9	10	-8	20	222.357
10	11	-6	20	226.71
11	12	-10	20	228.468
12	13	-14	19	221.248
13	14	-9	17	213.275
14	15	-5	16	216.87
15	16	-16	21	157.874
16	17	-6	15	157.443
17	18	-4	9	202.834
18	19	-5	13	252.15
19	20	-9	15	257.005
20	21	-4	14	249.228
21	22	-5	16	248.199
22	23	-6	16	239.574
23	24	-7	15	223.831
24	25	-5	15	218.29
25	26	-6	16	220.601
26	27	-8	15	205.427
27	28	-15	22	190.008
28	29	-12	16	174.668

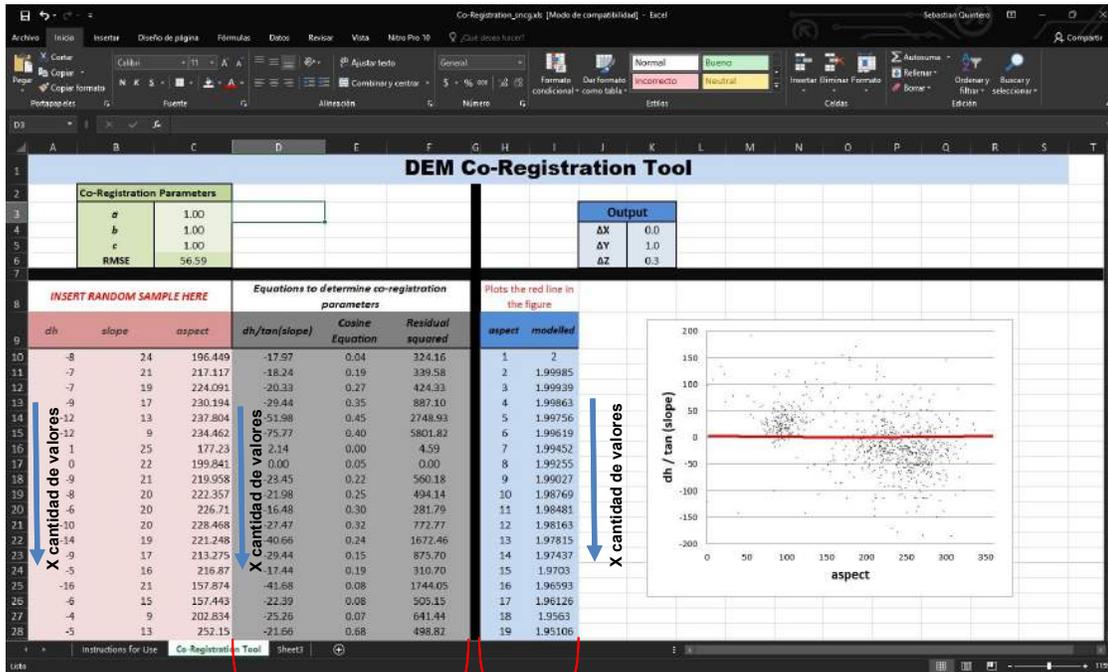
  

INSERT RANDOM SAMPLE HERE			
	dh	slope	aspect
9			
10	-8	24	196.449
11	-7	21	217.117
12	-7	19	224.091
13	-9	17	230.194
14	-12	13	237.804
15	-12	9	234.462
16	1	25	177.23
17	0	22	199.841
18	-9	21	219.958
19	-8	20	222.357
20	-6	20	226.71
21	-10	20	228.468
22	-14	19	221.248
23	-9	17	213.275
24	-5	16	216.87
25	-16	21	157.874
26	-6	15	157.443
27	-4	9	202.834
28	-5	13	252.15

**Nota:** Se tiene que prestar mucha atención a la hora de copiar los datos a la herramienta, para esto es recomendable borrar los datos dh, slope y aspect de la herramienta y copiar los nuevos.

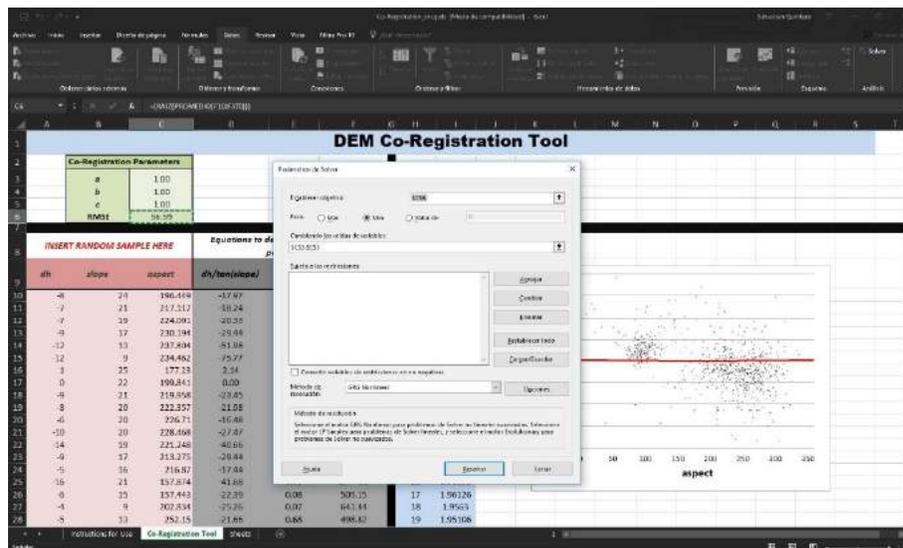
Una vez insertado los valores se debe prestar atención a la cantidad de estos, por ejemplo, si se insertaron 2000 valores que pertenecen a 2000 puntos ósea 2000 valores de dh, 2000 valores de slope y 2000 valores del aspect, este número de valores también deben coincidir con el campo de los datos de la ecuación para

determinar el co-registro (1) y lo mismo con el campo de los datos para generar la gráfica de dispersión de puntos (2):

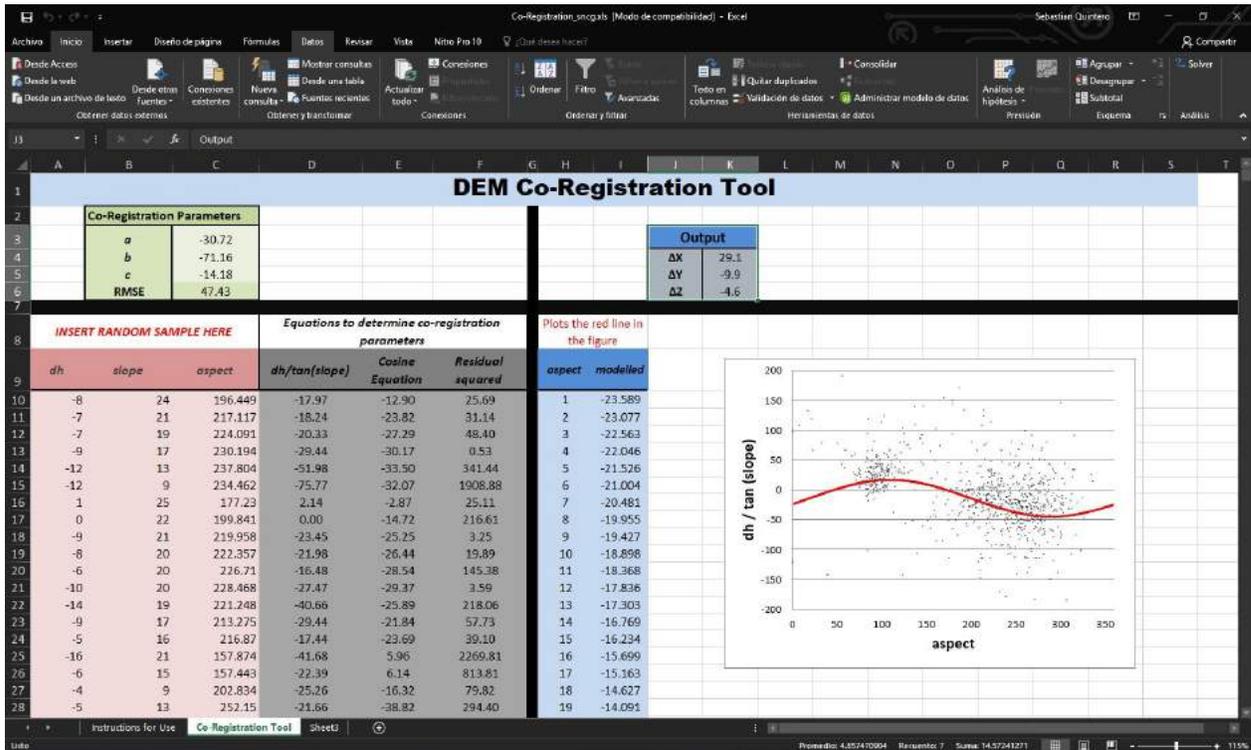


Ahora, una vez teniendo correctamente los datos y la cantidad de estos en la herramienta se observa que los valores para el Error de la Raíz Media Cuadrática o RMSE por sus siglas en ingles cambia por lo que ahora se utilizara la aplicación SOLVER de excel para optimizar este valor y así generar los ajustes correctos para  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$ , los cuales son los valores que realmente nos interesa para corregir el DEM SRTM.

Para esto en la herramienta solver donde dice Establecer objetivo seleccionamos la celda del valor RMSE y la opción Min, ahora en la sección Cambiando las Celdas de Variables seleccionamos los valores de las celdas a, b, c y a continuación click en resolver.



Aplicada la herramienta solver se puede observar que los datos a, b, c, RMSE,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  cambian, este cambio es una optimización de los datos reduciendo el RMSE para ajustar mucho mejor los datos, para el ejemplo se observa que en un principio al insertar los datos a la herramienta el valor de RMSE era de 56,59 y una vez aplicado el solver el RMSE bajo a 47,43. También se puede observar que la curva de la gráfica toma la tendencia de los datos, entre mejor sea el ajuste, la curva presenta una mejor tendencia de los datos:



**Nota:** Para una mejor optimización de los datos el RMSE debe ser mucho menor por lo que es necesario realizar este procedimiento varias veces, ya que la aplicación SOLVER no posee un algoritmo de ajuste robusto y esto se ve reflejado en la curva de tendencia (Nuth y Käab, 2011).

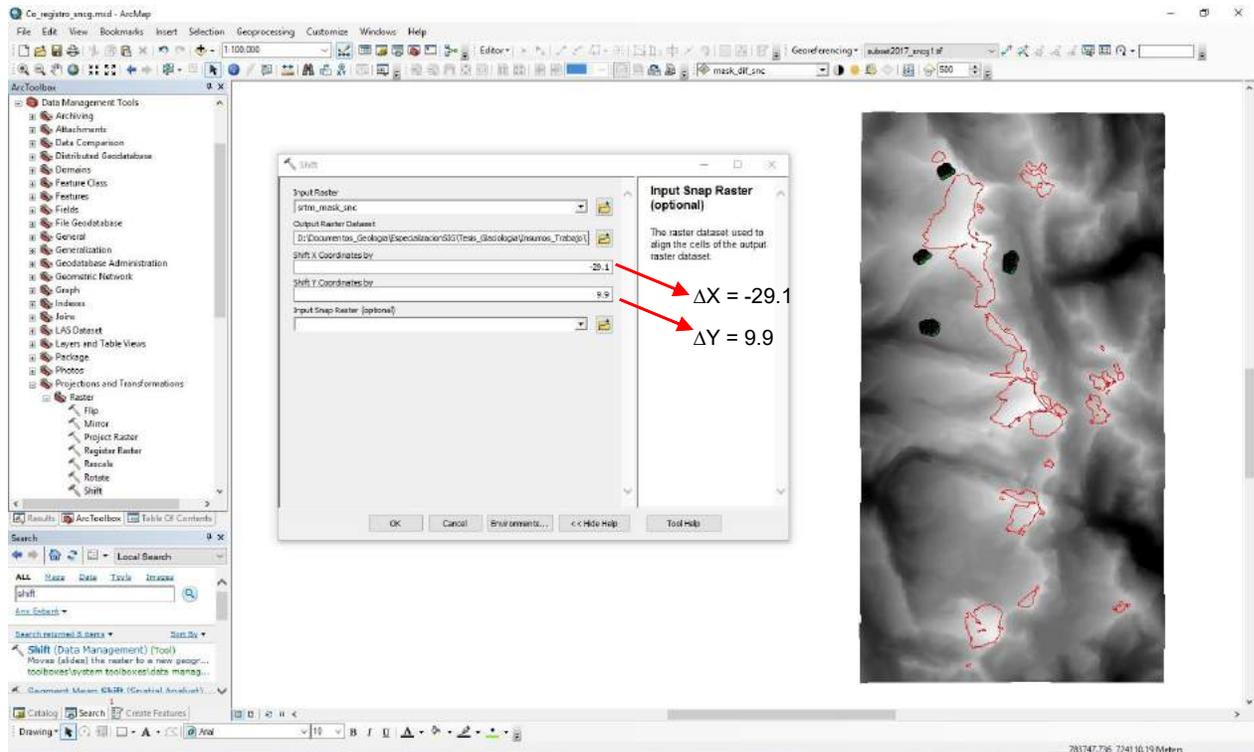
Ahora, se debe prestar mucha atención a los datos obtenidos  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  los cuales son los datos que se utilizarán para la corrección del DEM SRTM, se puede observar que estos datos tienen signos tanto positivos (+) como negativos (-) para el ejemplo  $\Delta X = 29.1$  (dirección en x) y  $\Delta Y = -9.9$  (dirección en y), por lo que ahora estos datos tendrán el signo opuesto  $\Delta X = -29.1$  (dirección en x) y  $\Delta Y = 9.9$  (dirección en y) para utilizar la herramienta Shift del software ArcGis:

Output	
$\Delta X$	29.1
$\Delta Y$	-9.9
$\Delta Z$	-4.6

→ -29.1  
→ 9.9

- **Arctoolbox – Data Management Tools – Projections and Transformations – Raster - Shift**

Esta corrección se realiza para el DEM SRTM:

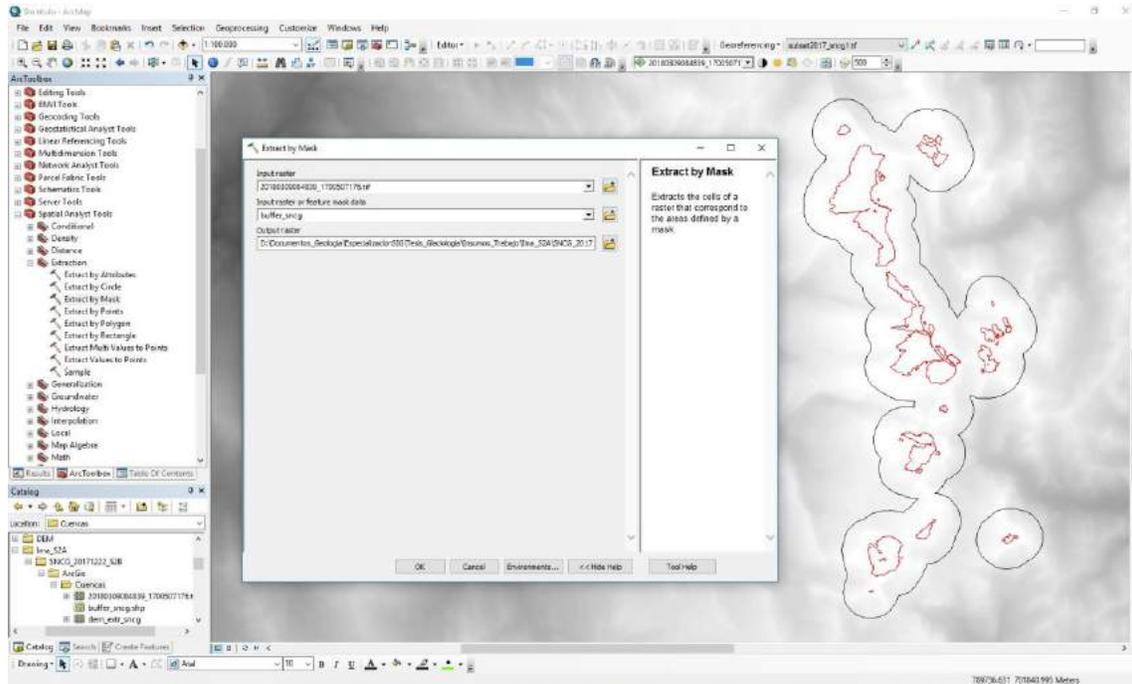


Una vez aplicado la herramienta shift con los valores previamente calculados por la herramienta de co-registro, se genera otro DEM, pero si se observa bien este ya se encuentra desplazado con respecto al DEM original, eliminando los sesgos tanto verticales como horizontales.

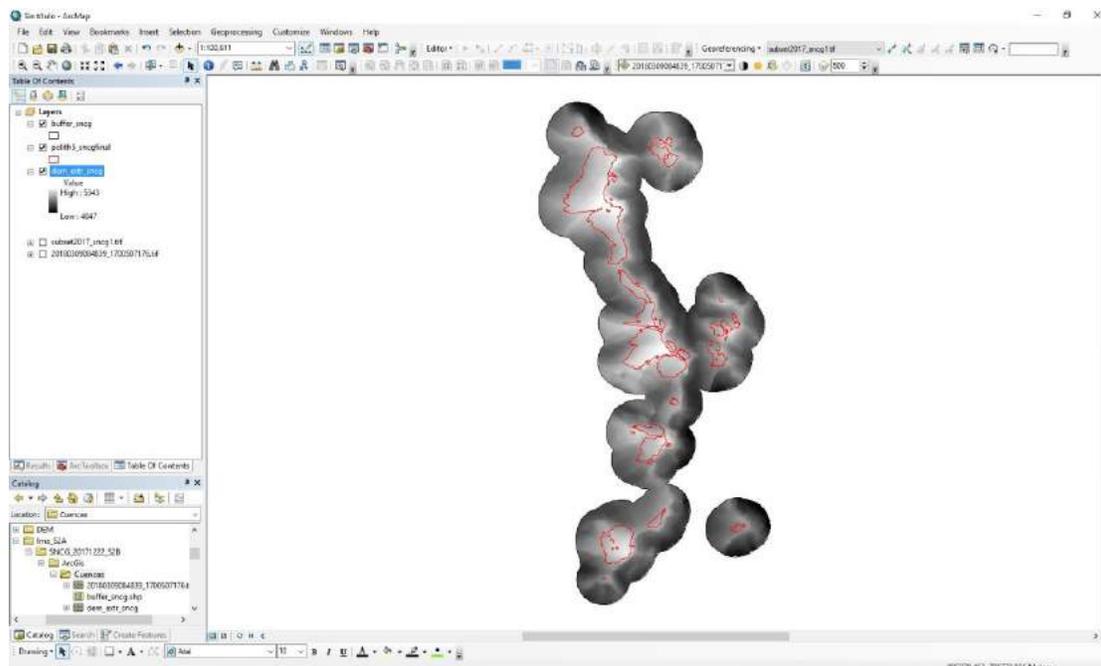


Para el trabajo, el buffer que se manejo fue de 1000 mt (1 km), esto con el fin de abarcar una amplia zona del área glaciar a lado y lado. Ya una vez generado el buffer, se procede a generar un recorte del DEM SRTM a partir del buffer con la herramienta *Extraction by Mask*:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Extraction – Extraction by Mask.*

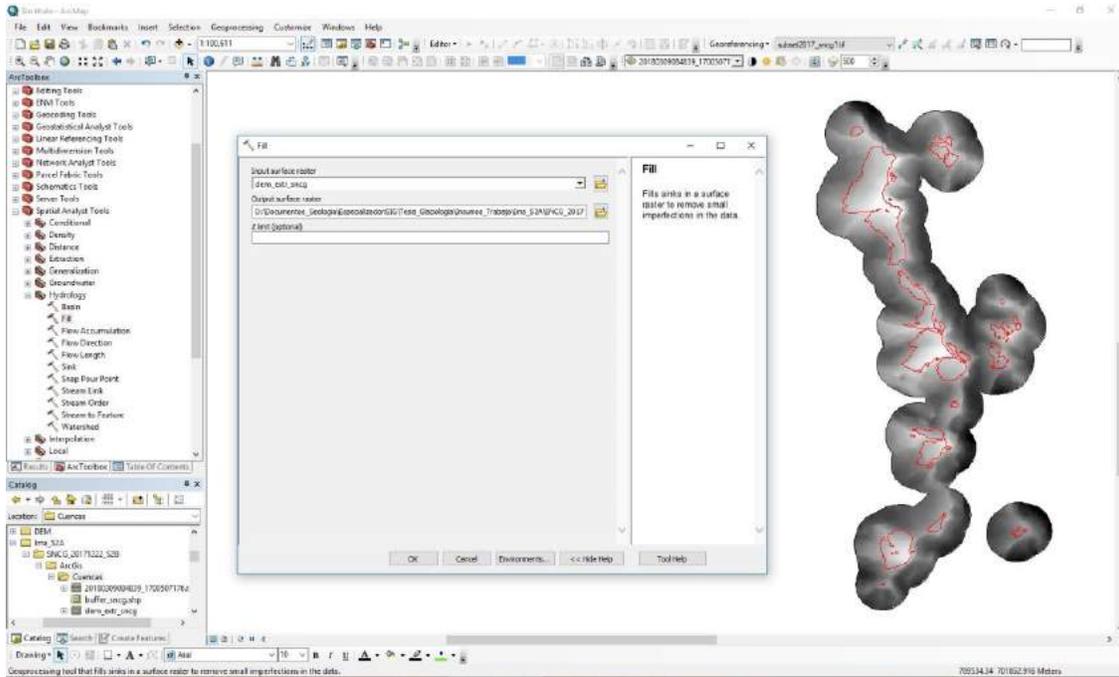


Resultado:



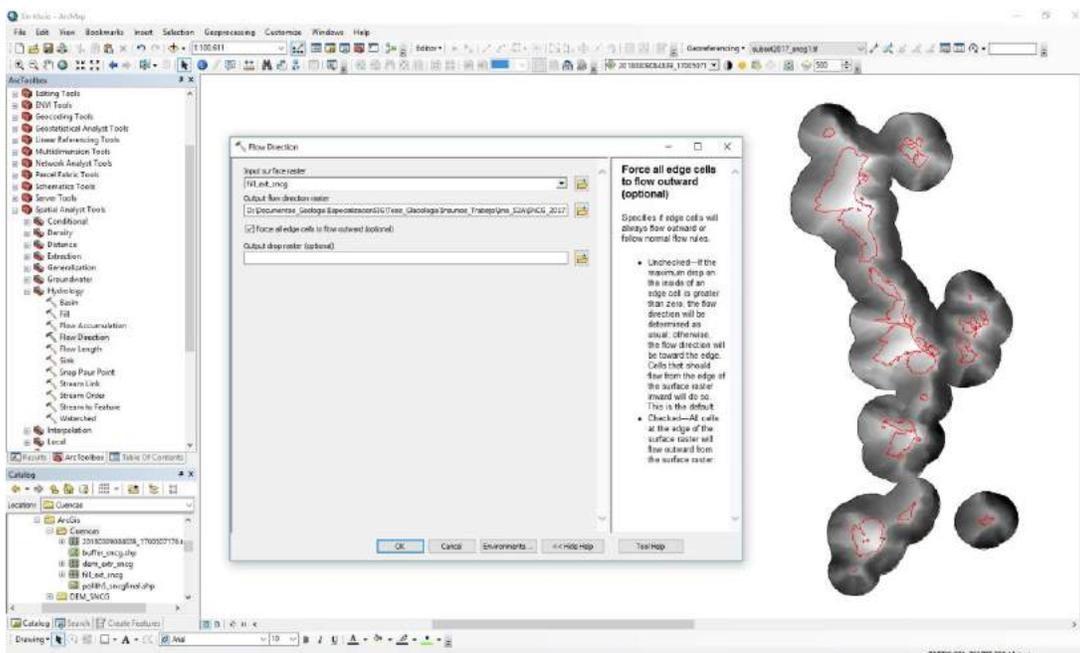
Ahora, se procede aplicar un filtro al recorte con la herramienta *Fill*, con el fin de limpiar el raster de errores:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Fill.*

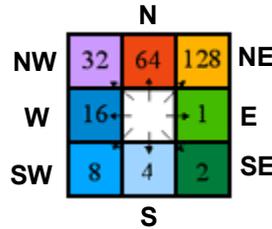


A continuación, se genera el *Flow Direction* a partir del *Fill*, esto con el fin de generar la dirección de flujo según el DEM, para posteriormente determinar cuencas de drenaje:

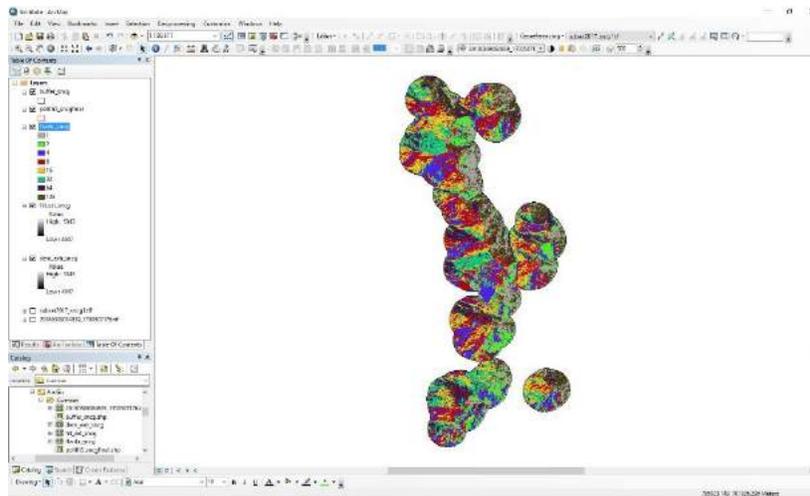
- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Flow Direction.*



El resultado es un raster, donde cada pixel presenta un color característico y un código asociado, este color y este código hace referencia a la dirección a la cual fluye el agua de pixel a pixel. La metodología consiste en que existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) y sigue un acercamiento presentado en Jenson and Domingue (1988).

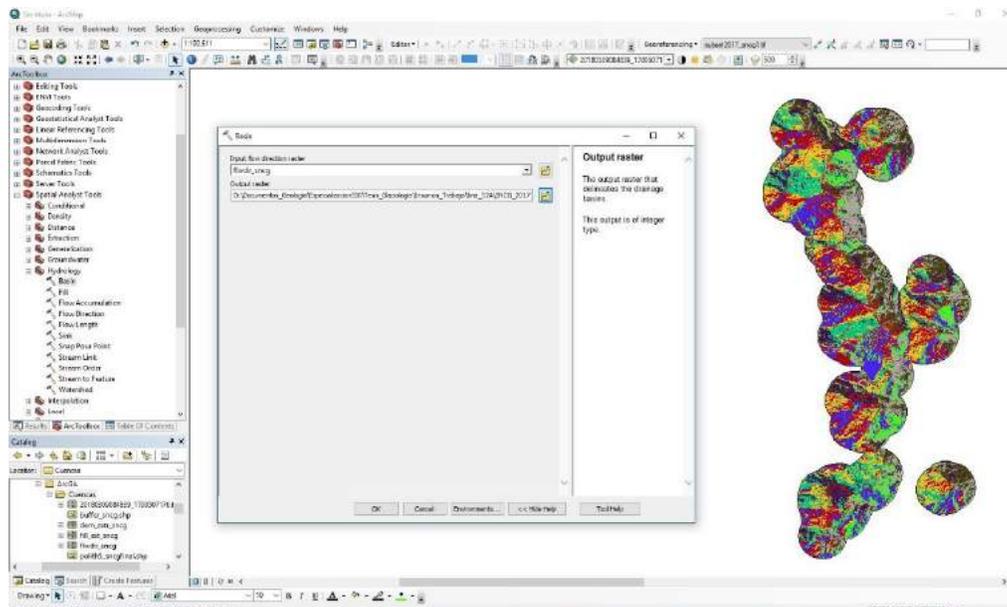


Resultado:

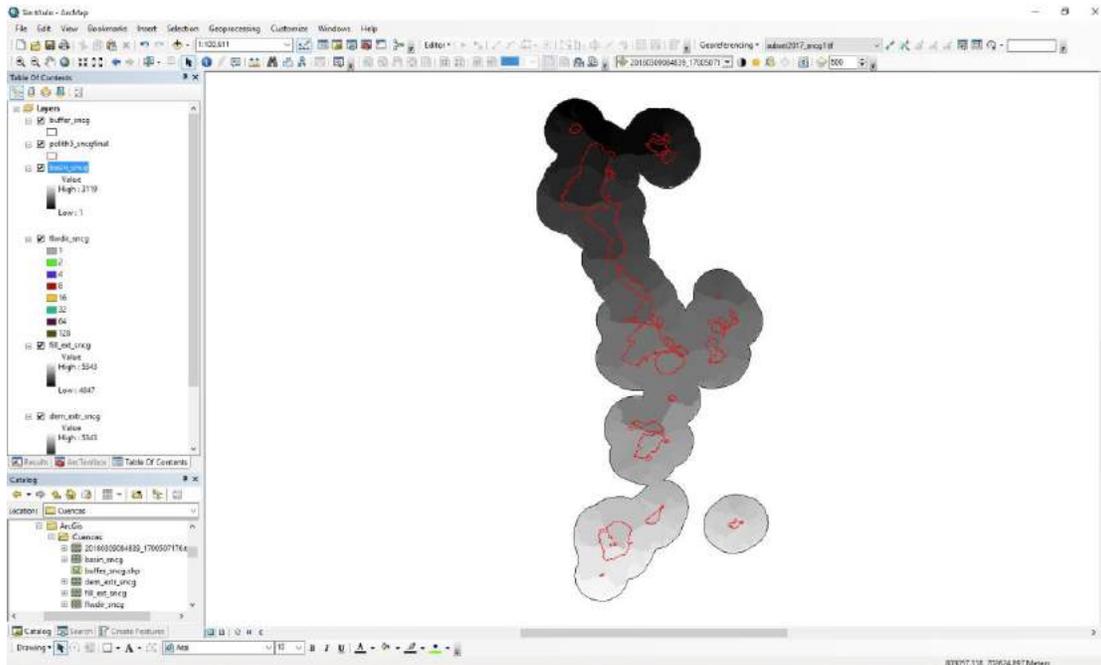


Una vez calculada la dirección de flujo, a partir de este se procede a determinar las cuencas de drenaje:

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Basin.*

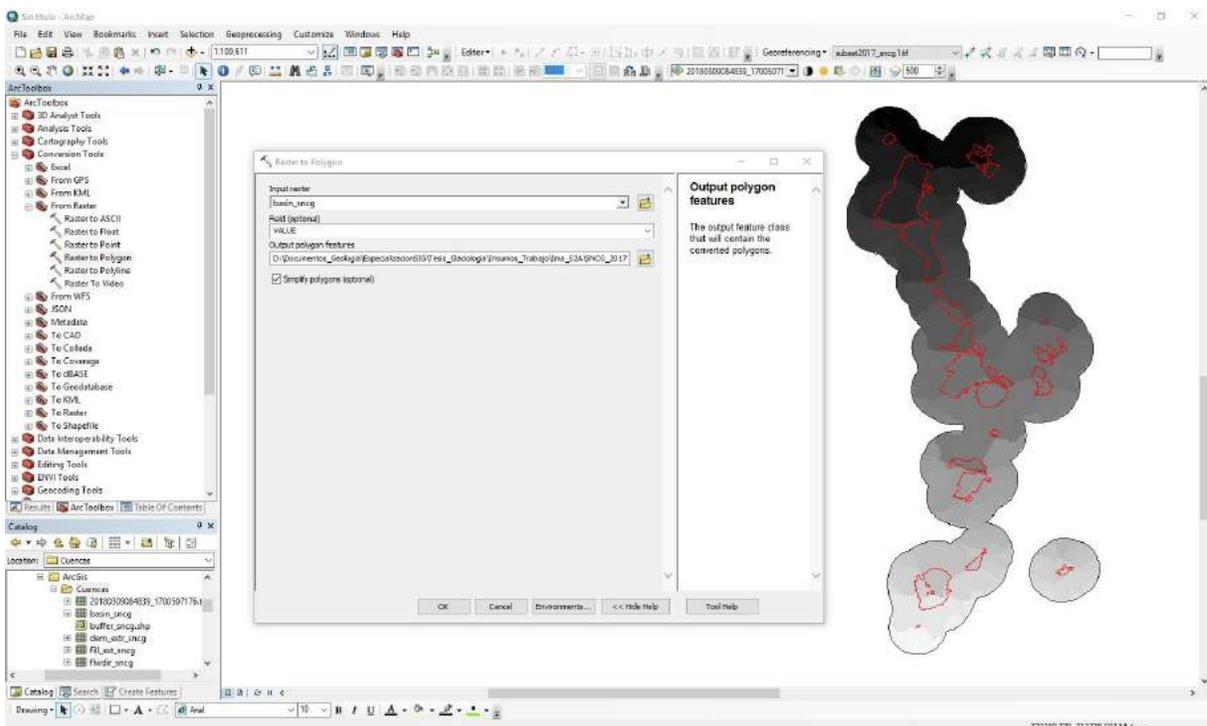


Resultado:

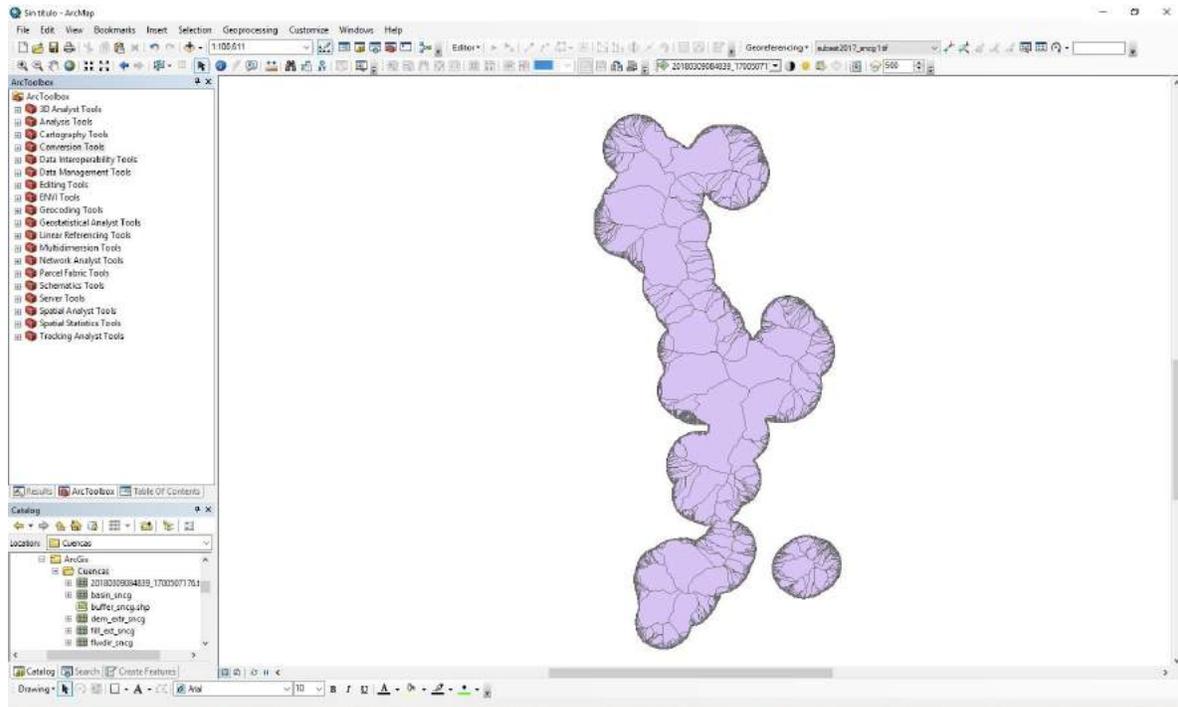


Ya generadas las cuencas, a la imagen raster de salida se procede a convertirla a polígono con el fin de realizar más adelante una intersección de las cuencas hidrográficas y las áreas glaciares:

- *Arctoolbox – Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon.*

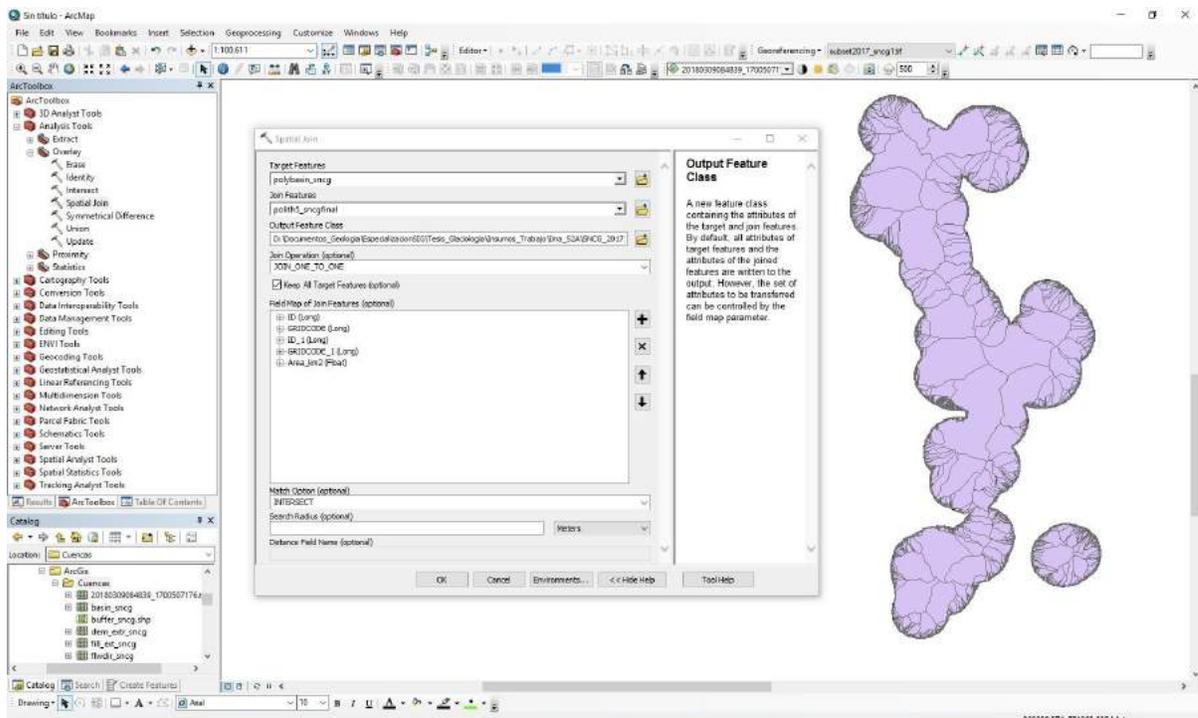


## Resultado:

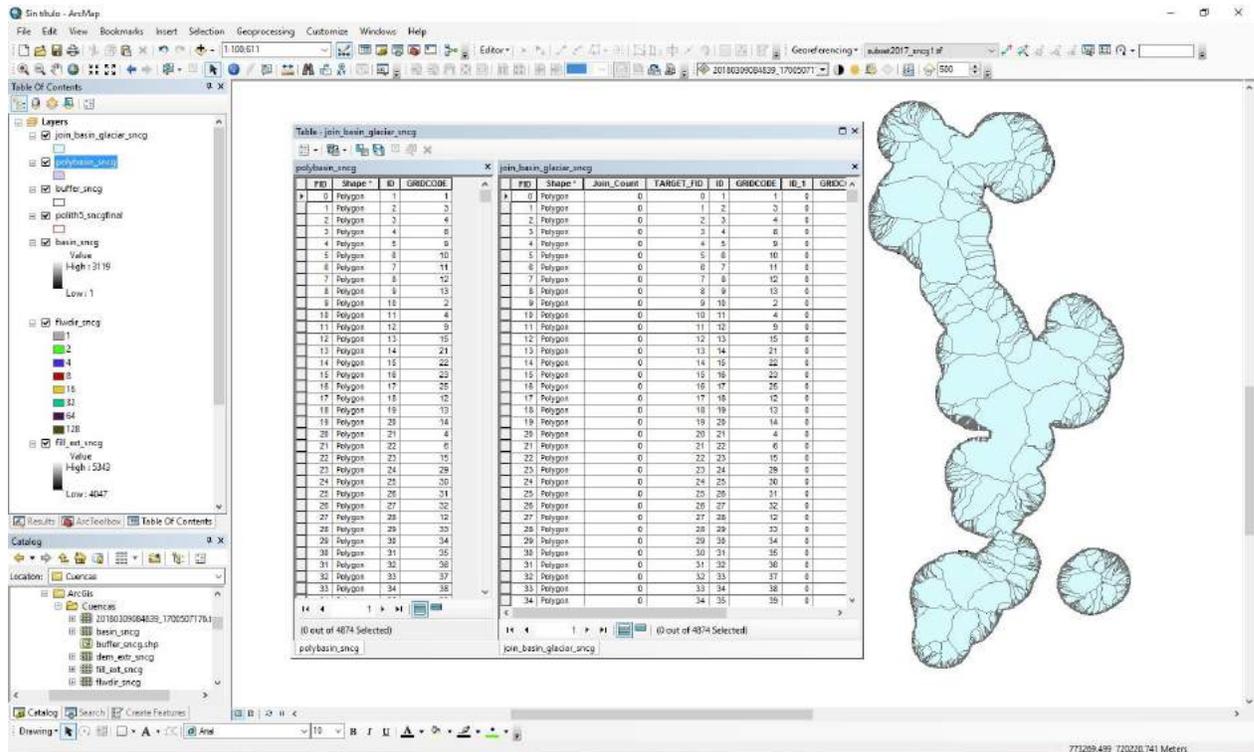


A partir de este resultado, se procede a generar un *Spatial Join* entre los polígonos de las cuencas de drenaje y el polígono de área glaciar, esto con el fin de excluir todas las cuencas de drenaje que no tengan relación espacial con un área glaciar:

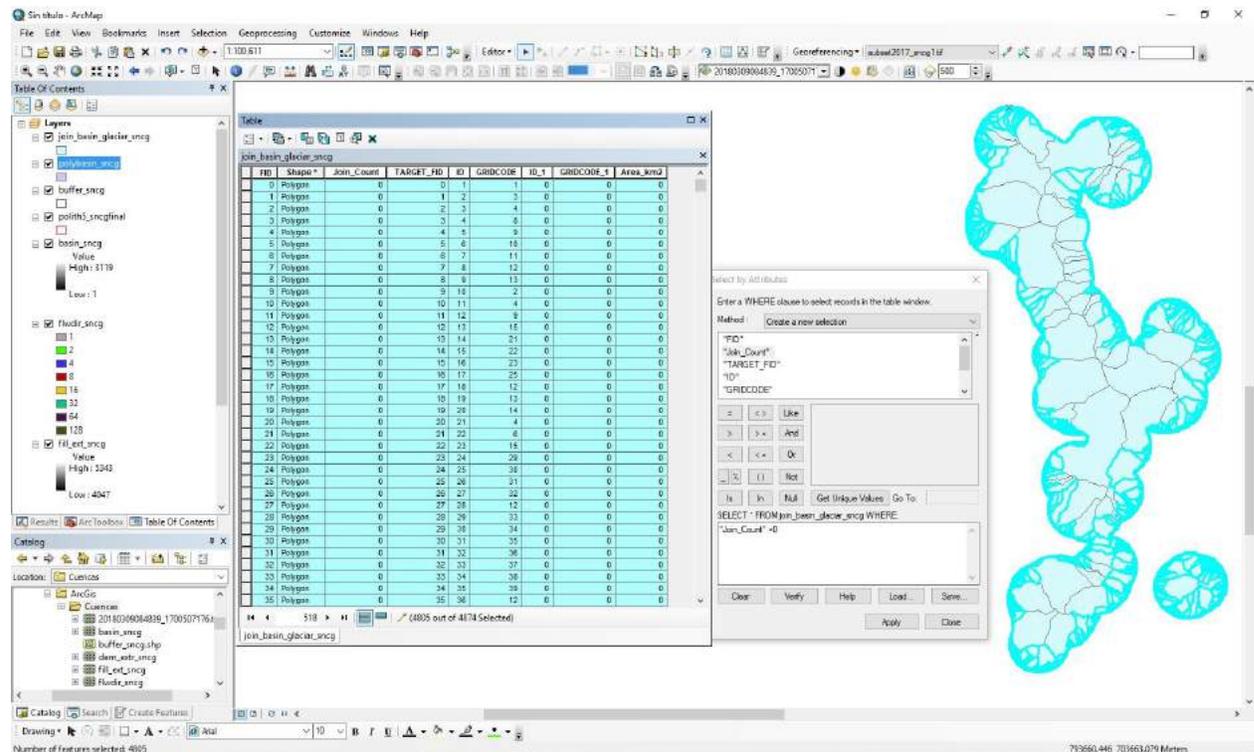
- *Arctoolbox – Analyst Tools – Overlay – Spatial Join.*



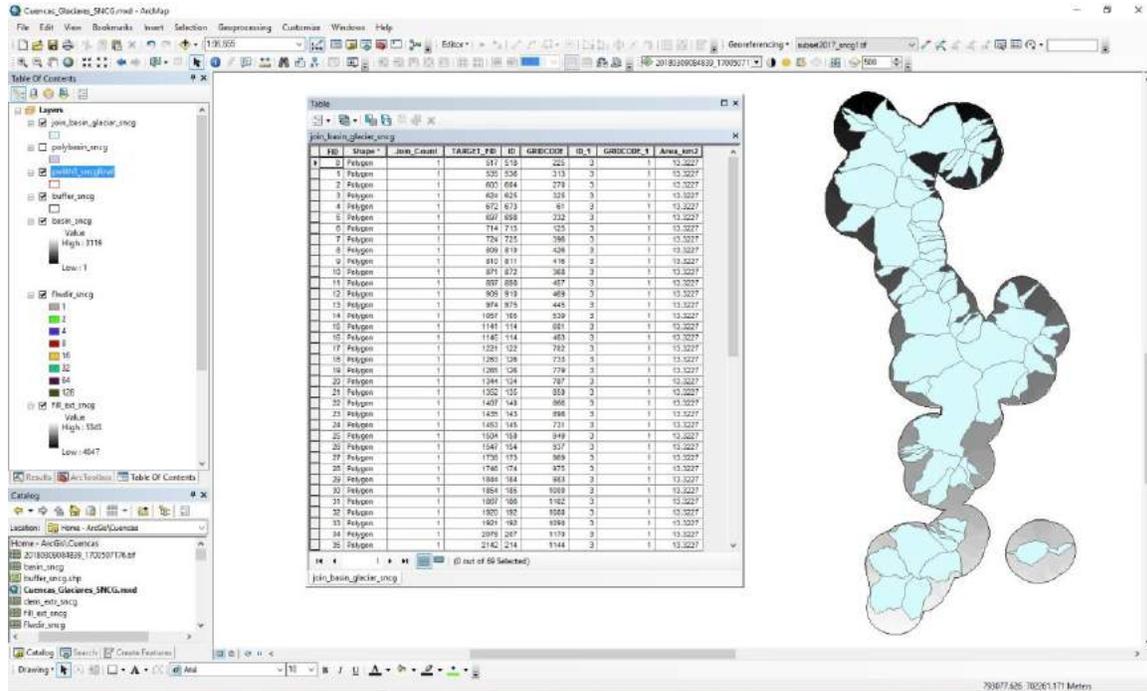
Resultado:



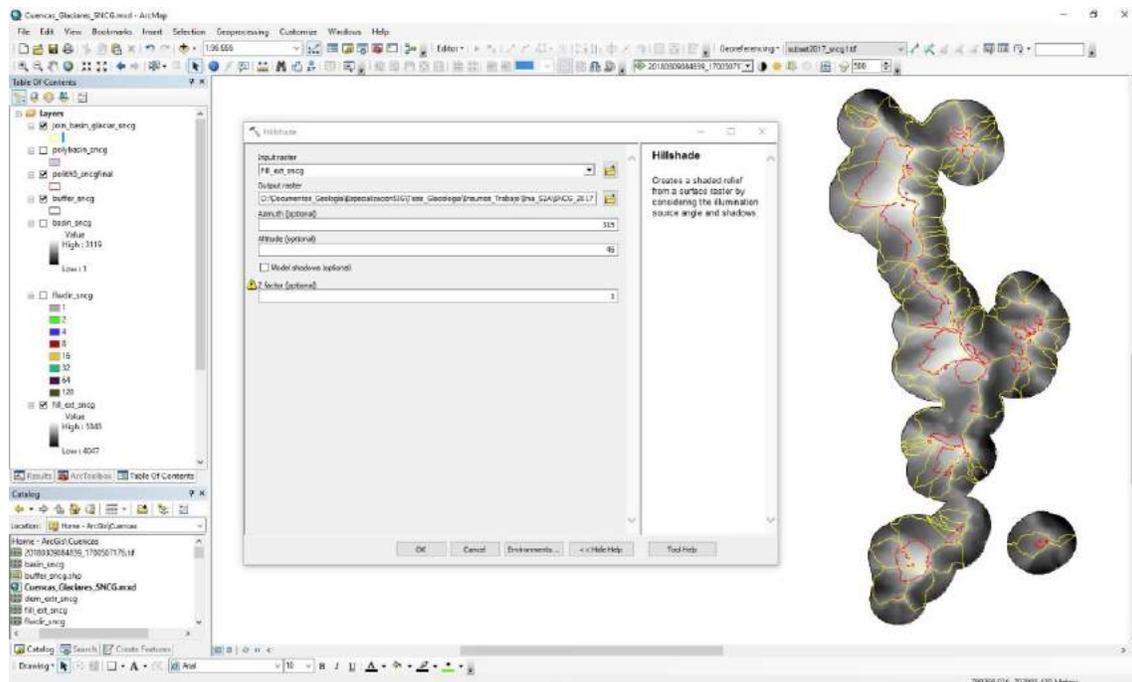
Al shapefile resultante, en la tabla de atributos seleccionamos las cuencas hidrográficas que serán eliminadas, estas se pueden identificar con el código "0" en la columna Join\_Count:

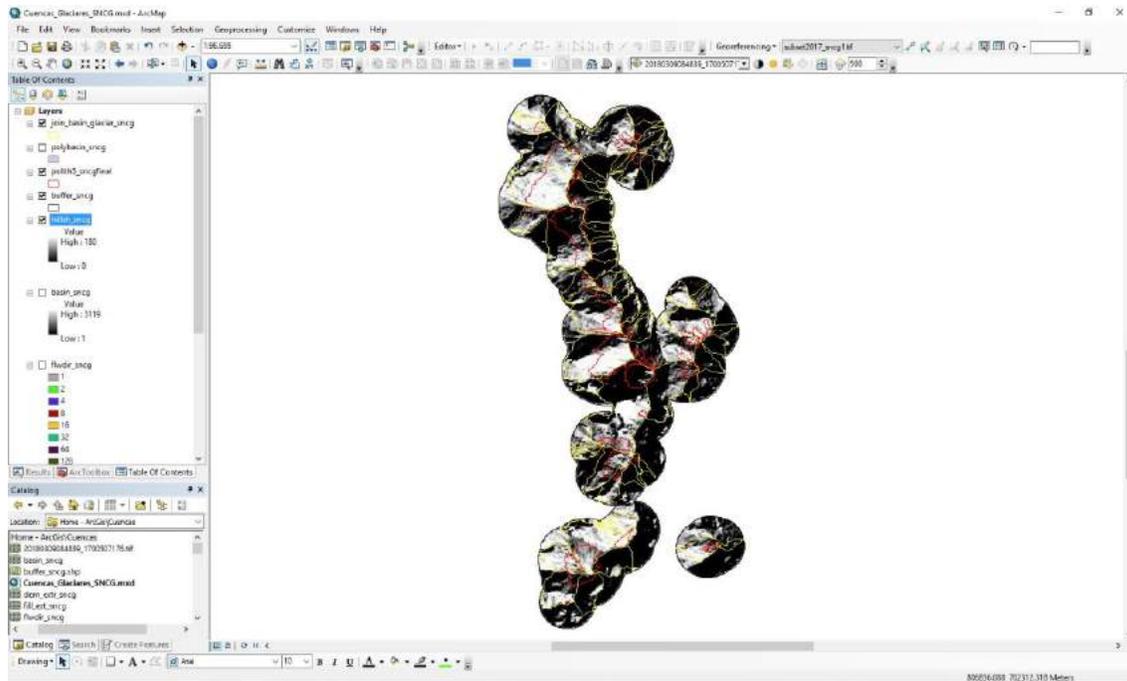


Resultado:

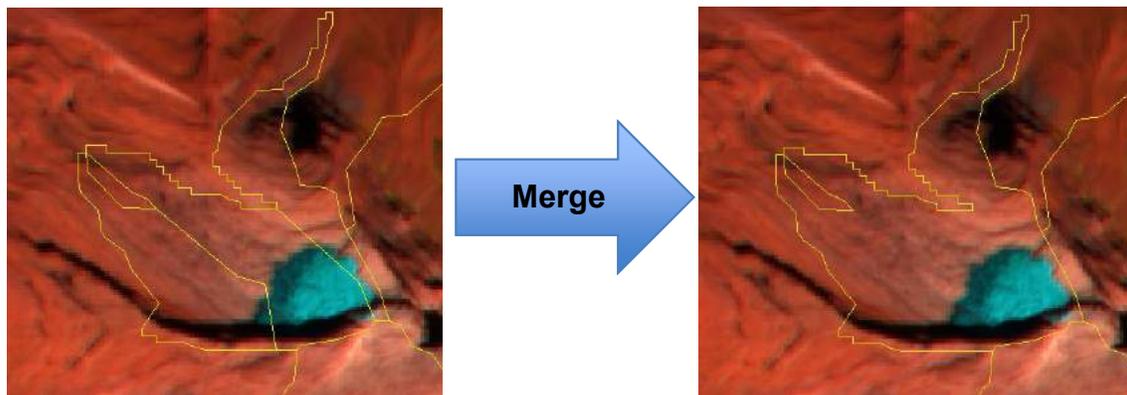


A partir de este insumo se procede a realizar una corrección manual de las cuencas, como recomendación se debe realizar un backup de este shapefile. Para apoyar un poco a esta corrección manual se hace necesario determinar el Hillshade o mapa de sombras a partir del DEM SRTM, además de esto es necesario tener a la mano la dirección de flujo y la imagen satelital:



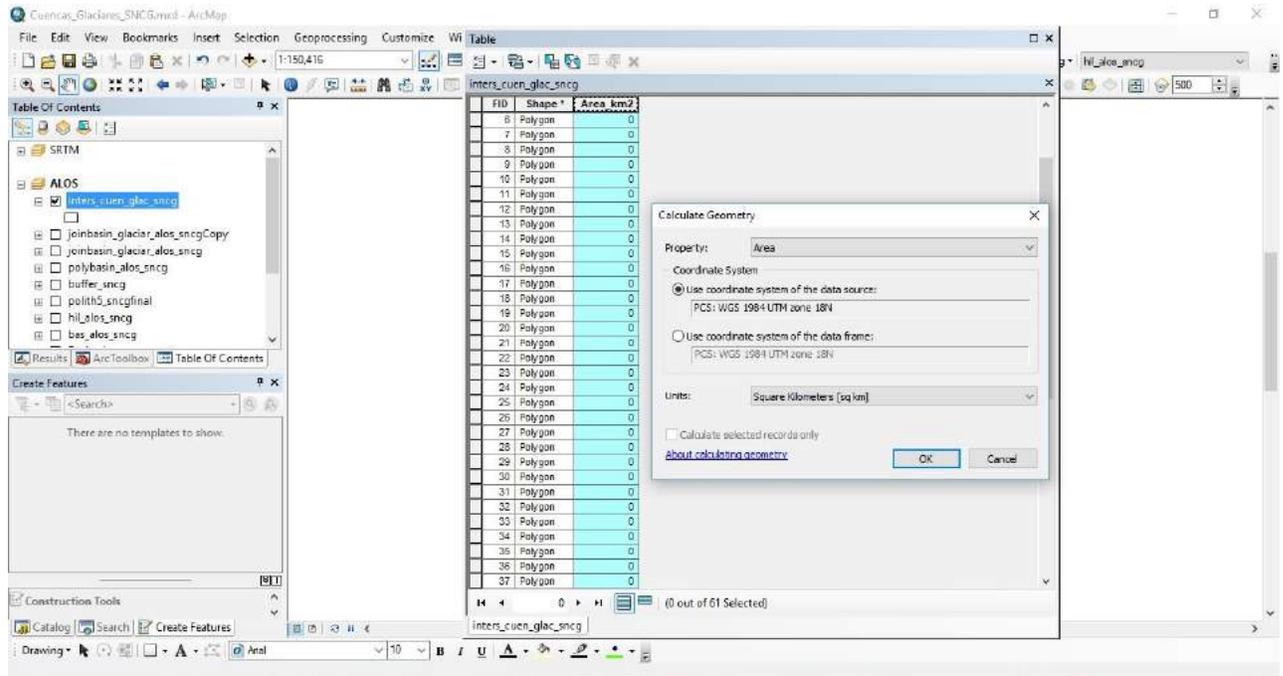


La corrección manual de las cuencas hace referencia a la edición (Merge, Clip, Cut, etc.) de los polígonos para que estos coincidan con los límites (divisoria de aguas), recordando que este paso es fundamental ya que se está generando más precisión en la delimitación de cuencas, por lo tanto, la interpretación por parte del profesional es muy importante:





Ahora bien, en la intersección, se copiarán todos los parámetros topográficos, por lo que es necesario primero que todo generar una columna en la tabla de atributos que está asociada al área glaciar (km<sup>2</sup>). **Nota:** Antes de calcular el área glaciar, se recomienda depurar la tabla de atributos borrando las columnas que no se necesiten.



Resultado:

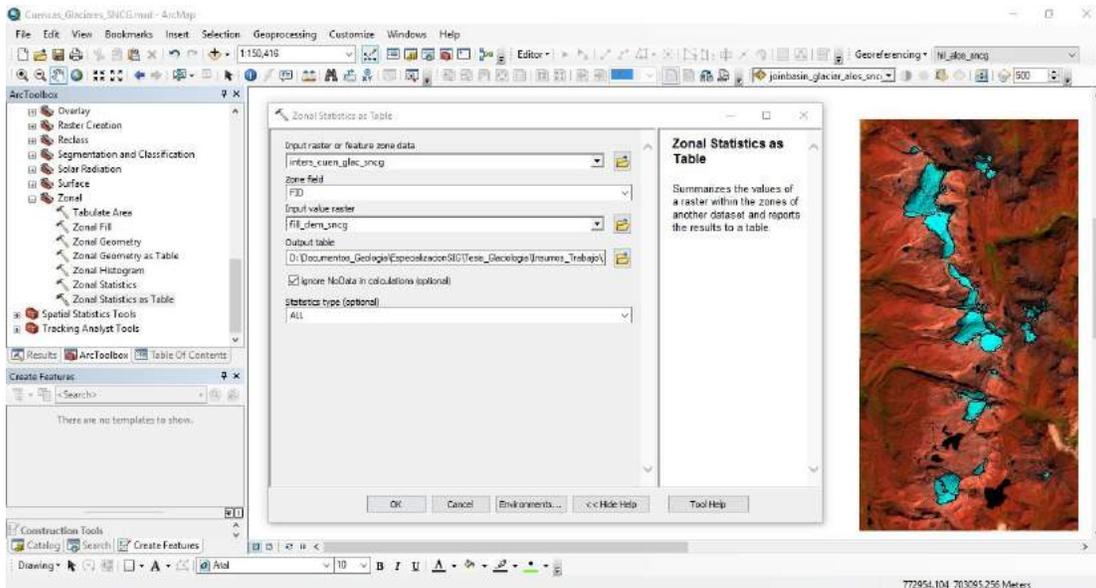
The screenshot shows the 'Table' window in ArcMap displaying the 'inters\_cuen\_glac\_sncg' table. The table has three columns: 'FID', 'Shape', and 'Area\_km2'. The 'Area\_km2' column now contains numerical values for each polygon feature.

FID	Shape	Area_km2
6	Polygon	0.030581
7	Polygon	0.028918
8	Polygon	0.135685
9	Polygon	1.40288
10	Polygon	0.178793
11	Polygon	0.037592
12	Polygon	1.69976
13	Polygon	0.001087
14	Polygon	0.013844
15	Polygon	0.016878
16	Polygon	0.002198
17	Polygon	0.246322
18	Polygon	0.0141
19	Polygon	0.000043
20	Polygon	0.001741
21	Polygon	0.000156
22	Polygon	0.000156
23	Polygon	0.007801
24	Polygon	0.816633
25	Polygon	0.000156
26	Polygon	0.00006
27	Polygon	0.059145
28	Polygon	0.244419
29	Polygon	0.005559
30	Polygon	0.271517
31	Polygon	0.016297
32	Polygon	1.60627
33	Polygon	0.015263
34	Polygon	0.24232
35	Polygon	0.009945
36	Polygon	0.605438
37	Polygon	0.082275

Ya calculada el área glaciar para cada entidad, se procede a determinar los parámetros estadísticos de cada intersección glaciar (shapefile), por lo tanto, estas estadísticas se calculan a partir del DEM SRTM, de las Pendientes (Slope) y del Aspecto u Orientación (Aspect):

- *Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Zonal – Zonal Statistics as Table.*

**Estadísticas DEM SRTM:**

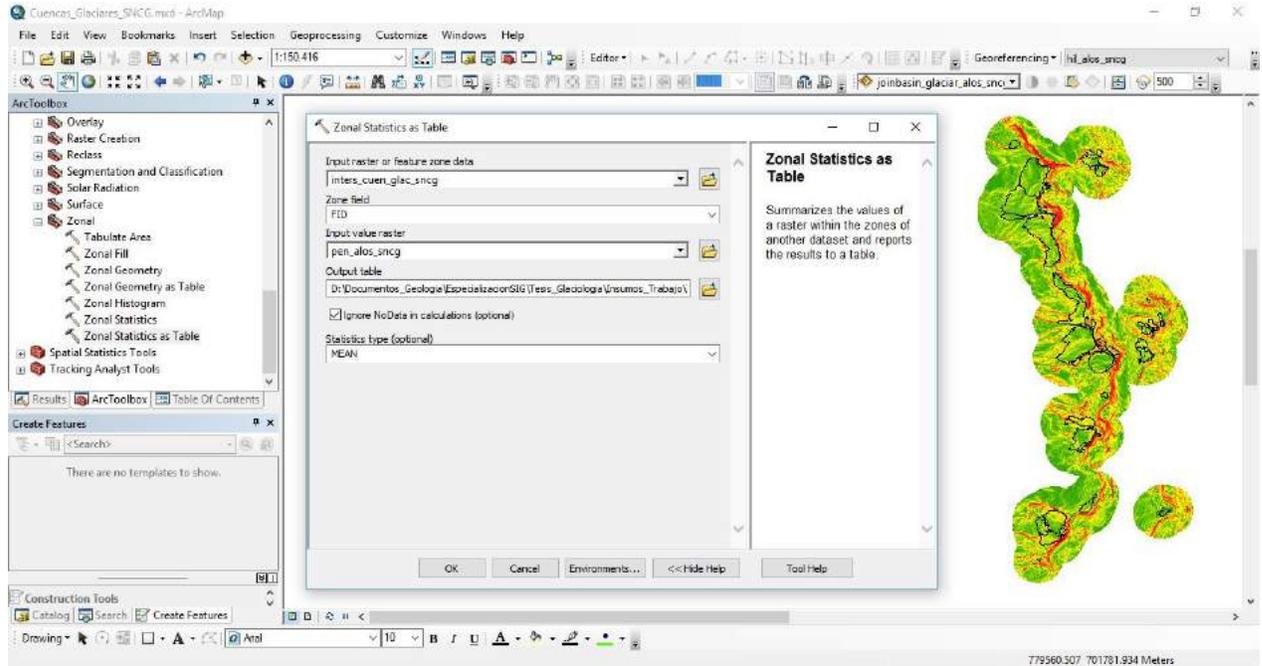


Resultado: Parámetros Topográficos a partir del DEM (min, max, mean, median).

Rowid	FID *	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1	0	141	126900	4824	4976	152	4883.893617	39.217832	688629	96	4834	4824	4879
2	1	67	60300	4833	5017	184	4945.074627	48.112838	331320	57	4868	4833	4948
3	2	22	19800	4970	4994	24	4985.136364	6.975903	109673	12	4989	4970	4988
4	3	15	13500	4990	5031	41	5010.133333	10.781878	75152	13	5014	4990	5014
5	4	318	286200	4663	5175	512	4932.940252	103.712621	1568675	220	4988	4663	4942
6	5	4	3600	4975	5032	57	5001.75	25.955491	20007	4	4975	4975	4977
7	6	212	190800	4852	5037	185	4940.806604	43.978182	1047451	117	4920	4852	4937
8	7	2969	267210	4728	5260	532	4978.288313	99.373611	1478053	469	4972	4728	4974
9	8	48	43200	4942	5124	182	5034.416667	45.406421	241652	40	5066	4942	5033
10	9	50	45000	4887	5022	135	4953.58	38.297305	247679	41	4891	4887	4951
11	10	197	177300	5001	5334	333	5188.253807	92.776335	1022086	138	5037	5001	5204
12	11	57	51300	5050	5343	293	5218.438596	79.916408	297451	49	5306	5050	5237
13	12	178	160200	4857	5093	236	4976.865169	54.521347	885882	120	4982	4857	4976
14	13	94	84600	4921	5093	172	4975.308511	34.289762	467679	62	4954	4921	4968
15	14	1842	165780	4727	5331	604	4988.252443	129.155924	9188361	494	4868	4727	4959
16	15	6	5400	4852	4914	62	4879.166667	21.590255	29275	6	4852	4852	4872
17	16	97	87300	4814	4989	175	4917.587629	33.015071	477006	64	4902	4822	4915
18	17	218	196200	4818	4939	121	4881.917431	26.697981	1064258	93	4864	4818	4884
19	18	17	15300	4936	4988	52	4955.058824	18.047228	84236	15	4941	4936	4946
20	19	17	15300	4872	4977	105	4929.117647	27.951391	83795	16	4937	4872	4934
21	20	39	35100	4948	5017	69	4985	19.897172	194415	29	4970	4948	4978
22	21	87	78300	4859	5122	263	4981.103448	80.358398	433356	67	4905	4859	4967
23	22	862	775800	4701	5133	432	4927.348028	59.726189	4247374	244	4915	4701	4925
24	23	18	16200	4877	4971	94	4942.111111	28.85575	88958	16	4964	4877	4954
25	24	266	239400	4741	5120	379	4896.428571	96.271021	1302450	177	4877	4741	4872

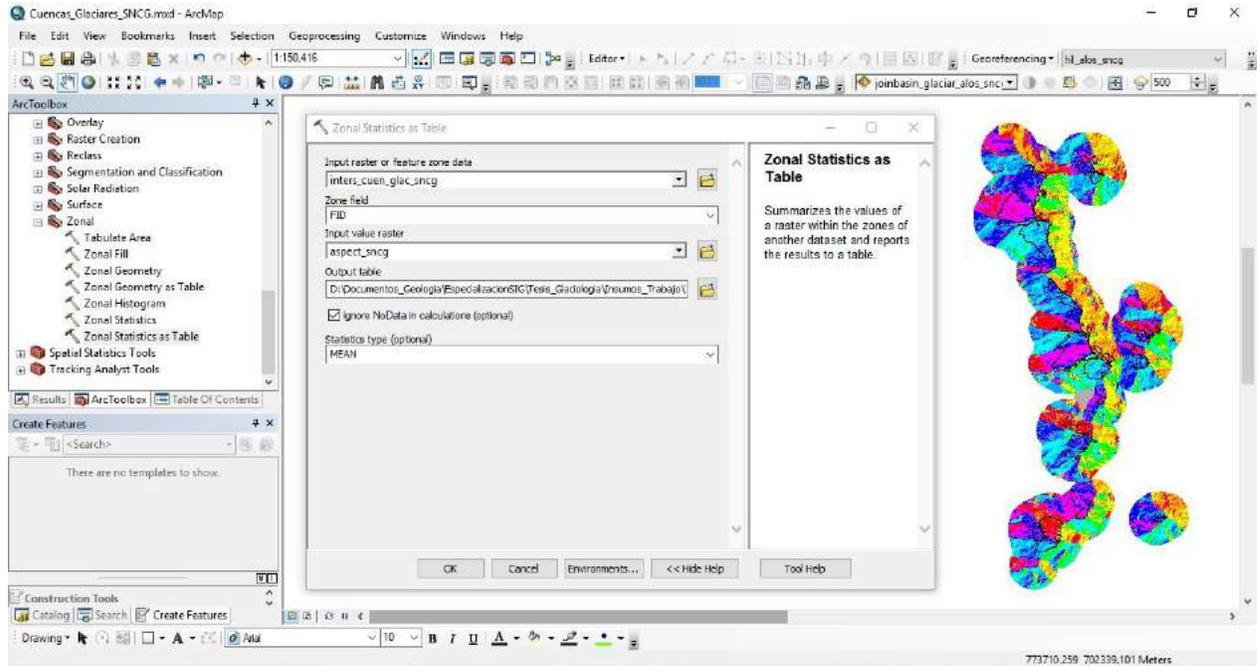
A partir del DEM SRTM se genera el raster de pendientes (slope) y el raster de aspecto u orientación (aspect). Una vez generado cada raster se procede a calcular las estadísticas de cada uno:

### Estadísticas Pendientes (Slope):



Rowid	FID	COUNT	AREA	MEAN
1	0	780	123125	19.87544
2	1	379	59218.75	32.618751
3	2	121	18906.25	16.727282
4	3	9	1406.25	27.787513
5	4	1161	181406.25	21.746866
6	5	8813	1377031.25	17.440879
7	6	197	30761.25	33.86224
8	7	176	27500	23.873193
9	8	870	135837.5	21.552766
10	9	8961	1483261.25	19.267095
11	10	1148	179375	15.910874
12	11	240	37500	26.419247
13	12	10874	1699082.5	22.83861
14	13	8	1250	28.091438
15	14	89	13906.25	24.128589
16	15	109	17031.25	26.877493
17	16	16	2500	10.74201
18	17	1572	245625	18.343981
19	18	91	14218.75	28.957708
20	20	10	1962.5	17.63898
21	21	1	156.25	40.985057
22	22	1	156.25	38.21748
23	23	53	8261.25	22.849321
24	24	5240	818750	24.117706
25	25	1	156.25	28.854091
26	27	383	58943.75	33.855823
27	28	1556	243125	31.008689
28	29	36	5468.75	30.656258
29	30	1734	270937.5	25.089683
30	31	103	16093.75	29.437628
31	32	10243	1600488.75	20.614824
32	33	98	15312.5	19.11001

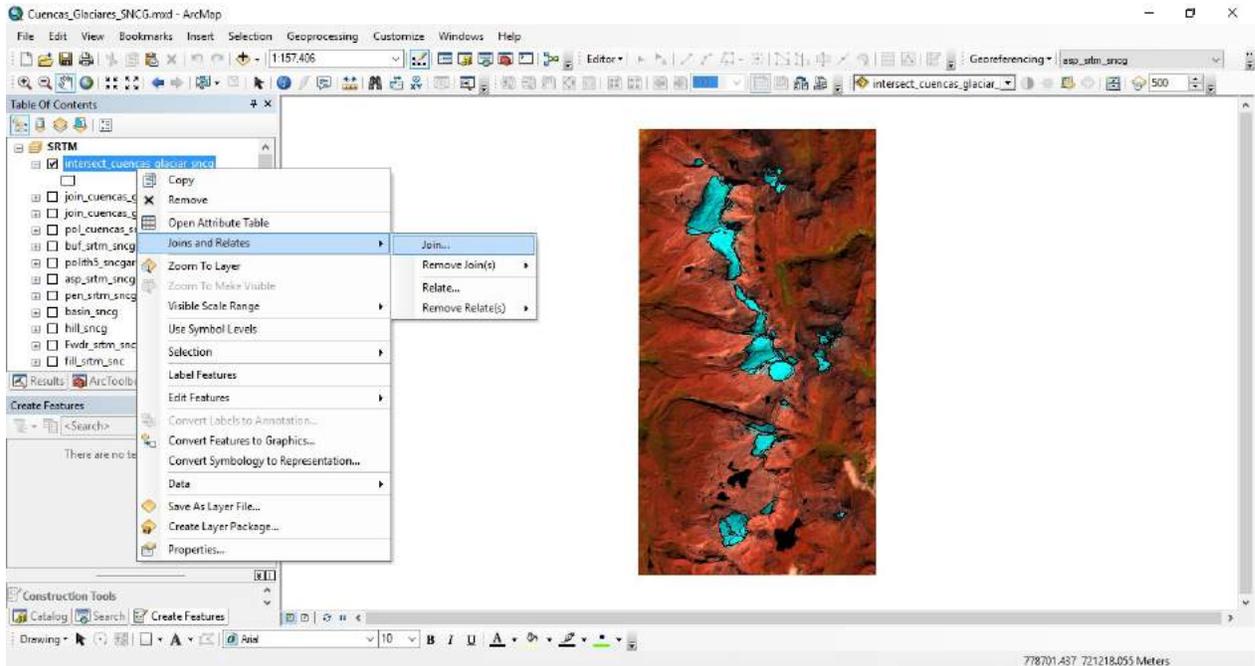
**Estadísticas Aspecto u Orientación (Aspect):**



Resultado:

Rowid	FID	COUNT	AREA	MEAN
1	0	788	123125	293.070534
2	1	379	59218.75	65.335244
3	2	121	18906.25	178.565481
4	3	9	1406.25	57.430877
5	4	1181	181406.25	214.135302
6	5	8613	1377031.25	275.959637
7	6	197	30781.25	112.748458
8	7	176	27500	182.758698
9	8	870	135937.5	158.631361
10	9	8981	1403281.25	306.227413
11	10	1148	179375	253.364151
12	11	240	37500	128.516834
13	12	10874	1699062.5	226.872841
14	13	8	1250	293.961529
15	14	89	13906.25	173.348852
16	15	109	17031.25	177.69845
17	16	16	2500	205.476533
18	17	1572	245625	247.827252
19	18	91	14218.75	329.202267
20	20	10	1562.5	147.070846
21	21	1	156.25	32.774876
22	22	1	156.25	36.027374
23	23	53	8281.25	83.244142
24	24	5240	818750	269.482716
25	25	1	156.25	34.562523
26	27	383	59843.75	49.511674
27	28	1556	243125	269.927715
28	29	35	5468.75	74.420284
29	30	1734	270937.5	282.913816
30	31	103	16093.75	136.289271
31	32	10243	1600468.75	282.570799
32	33	98	15312.5	219.768094

Ya calculadas las estadísticas del DEM SRTM, Pendientes y Aspecto, se procede a realizar un Join de Tablas con respecto a el shapefile intersección de área glaciar y cuencas hidrográficas:



Join Data <b>Join SRTM</b>	Join Data <b>Join Pendientes (Slope)</b>	Join Data <b>Join Aspecto (Aspect)</b>
<p>Join lets you append additional data to this layer's attribute table so you can, for example, symbolize the layer's features using this data.</p>	<p>Join lets you append additional data to this layer's attribute table so you can, for example, symbolize the layer's features using this data.</p>	<p>Join lets you append additional data to this layer's attribute table so you can, for example, symbolize the layer's features using this data.</p>
<p>What do you want to join to this layer?</p>	<p>What do you want to join to this layer?</p>	<p>What do you want to join to this layer?</p>
<p>Join attributes from a table</p>	<p>Join attributes from a table</p>	<p>Join attributes from a table</p>
<p>1. Choose the field in this layer that the join will be based on:                  FID</p>	<p>1. Choose the field in this layer that the join will be based on:                  FID</p>	<p>1. Choose the field in this layer that the join will be based on:                  FID</p>
<p>2. Choose the table to join to this layer, or load the table from disk:                  estadistica_dem_srtm_sncg  <input checked="" type="checkbox"/> Show the attribute tables of layers in this list</p>	<p>2. Choose the table to join to this layer, or load the table from disk:                  estadistica_slope_sncg  <input checked="" type="checkbox"/> Show the attribute tables of layers in this list</p>	<p>2. Choose the table to join to this layer, or load the table from disk:                  estadistica_aspect_sncg  <input checked="" type="checkbox"/> Show the attribute tables of layers in this list</p>
<p>3. Choose the field in the table to base the join on:                  FID</p>	<p>3. Choose the field in the table to base the join on:                  FID</p>	<p>3. Choose the field in the table to base the join on:                  FID</p>
<p>Join Options  <input checked="" type="radio"/> Keep all records                  All records in the target table are shown in the resulting table. Unmatched records will contain null values for all fields being appended into the target table from the join table.   <input type="radio"/> Keep only matching records                  If a record in the target table doesn't have a match in the join table, that record is removed from the resulting target table.</p>	<p>Join Options  <input checked="" type="radio"/> Keep all records                  All records in the target table are shown in the resulting table. Unmatched records will contain null values for all fields being appended into the target table from the join table.   <input type="radio"/> Keep only matching records                  If a record in the target table doesn't have a match in the join table, that record is removed from the resulting target table.</p>	<p>Join Options  <input checked="" type="radio"/> Keep all records                  All records in the target table are shown in the resulting table. Unmatched records will contain null values for all fields being appended into the target table from the join table.   <input type="radio"/> Keep only matching records                  If a record in the target table doesn't have a match in the join table, that record is removed from the resulting target table.</p>
<p>Validate Join</p>	<p>Validate Join</p>	<p>Validate Join</p>
<p><a href="#">About joining data</a> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/></p>	<p><a href="#">About joining data</a> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/></p>	<p><a href="#">About joining data</a> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/></p>

Resultado:

FID	Shape *	Area_km2	FID *	MIN	MAX	MEAN	MEDIAN	FID *	MEAN	FID *	MEAN
0	Polygon	0.1241	0	4824	4976	4883.893617	4879	0	24.074836	0	299.020479
1	Polygon	0.060821	1	4833	5017	4945.074627	4948	1	33.281589	1	64.408019
2	Polygon	0.020725	2	4970	4994	4985.136364	4988	2	10.911618	2	69.008275
3	Polygon	0.018323	3	4990	5031	5010.133333	5014	3	18.090312	3	165.912957
4	Polygon	0.280377	4	4663	5175	4932.940252	4942	4	23.653636	4	253.057052
5	Polygon	0.003963	5	4975	5032	5001.75	4977	5	33.168916	5	86.795015
6	Polygon	0.193109	6	4852	5037	4940.806604	4937	6	20.419359	6	221.710245
7	Polygon	2.67085	7	4728	5260	4978.288313	4974	7	18.0007	7	293.669626
8	Polygon	0.039963	8	4942	5124	5034.416667	5033	8	26.397661	8	103.054491
9	Polygon	0.04294	9	4887	5022	4953.58	4951	9	34.190711	9	154.106974
10	Polygon	0.176284	10	5001	5334	5188.253807	5204	10	21.615557	10	156.072807
11	Polygon	0.050949	11	5050	5343	5218.438596	5237	11	33.481334	11	148.591546
12	Polygon	0.162138	12	4857	5093	4976.865169	4976	12	16.484781	12	249.984021
13	Polygon	0.081244	13	4921	5093	4975.308511	4968	13	23.169903	13	134.997183
14	Polygon	1.6619	14	4727	5331	4988.252443	4959	14	22.458506	14	225.572162
15	Polygon	0.00362	15	4852	4914	4879.166667	4872	15	16.504198	15	256.976466
16	Polygon	0.089659	16	4814	4989	4917.587629	4915	16	23.078467	16	160.193074
17	Polygon	0.193222	17	4818	4939	4881.917431	4884	17	17.284959	17	250.811664
18	Polygon	0.015483	18	4936	4988	4955.058824	4946	18	10.478169	18	202.437908
19	Polygon	0.014143	19	4872	4977	4929.117647	4934	19	28.870841	19	295.349037
20	Polygon	0.032497	20	4948	5017	4985	4978	20	24.259227	20	168.796107
21	Polygon	0.075291	21	4859	5122	4981.103448	4967	21	31.181389	21	57.443633
22	Polygon	0.772274	22	4701	5133	4927.348028	4925	22	24.032897	22	269.291891
23	Polygon	0.016815	23	4877	4971	4942.111111	4954	23	30.320569	23	45.727525
24	Polygon	0.237952	24	4741	5120	4896.428571	4872	24	29.340666	24	280.207908

Columna que hace referencia al # total de cuencas glaciares para cada superficie glaciar

Área Glaciar a partir de la delimitación glaciar de imágenes Sentinel 2

A partir del DEM cálculo de elevación máxima, mínima, media y mediana.

Pendiente Media

Aspecto u orientación media