



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

**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.**

Autor: Lesly Jineth García Cantillo
Ingeniera Forestal

Tutor: Luis Giovanni Carvajal Rodríguez
Asesor Catastral

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA DIRECCIÓN DE POSTGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
Bogotá D.C.
2016**

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA UBICADO EN LOS DEPARTAMENTOS DEL TOLIMA, CAUCA Y HUILA EN LOS AÑOS 1989, 1999, 2002, 2014 Y 2016.

MULTITEMPORAL ANALYSIS OF THE GLACIER RECOIL OF THE VOLCÁN NEVADO DEL HUILA LOCATED IN THE DEPARTMENTS AT TOLIMA, CAUCA Y HUILA IN THE YEARS 1989, 1999, 2002, 2014 AND 2016.

Lesly Jineth García Cantillo
Ingeniera Forestal
Profesional Subdirección de geografía y cartografía-IGAC
les2155@hotmail.com

RESUMEN

Se realizó un análisis multitemporal, con el fin de demostrar el comportamiento del glaciar “Volcán Nevado del Huila”, mediante la implementación de cinco imágenes Landsat de los años 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016, donde se evidencia el retroceso del glaciar en los últimos 26 años.

Mediante la revisión de metodologías aplicadas en estudios multitemporales para determinar el área de deshielo, se estableció utilizar los software PCI Geomatics y ArcGis, para el procesamiento de las imágenes satelitales, aplicando conocimientos de interpretación de imágenes y de geomática, además se empleó herramientas de corrección atmosférica, Clipping, panshar, clasificación supervisada, filtros y diferentes algoritmos, obteniendo la clasificación de cada una de las coberturas con énfasis en el área del glaciar, para posteriormente convertir los datos raster a vectoriales, con el fin de calcular el área glaciar, tendencia de los datos y cambio de tasa anual, para finalmente analizar el comportamiento del área del glaciar para cada uno de los años de estudio.

Con la aplicación de los programas y herramientas anteriormente descritas, se llegó al resultado que el retroceso del glaciar para el periodo de 1989 al 2016 fue de un 61% de su área, lo que equivale a una pérdida de 11,73 Km².

Palabras Claves: Glaciar, Retroceso, Volcán Nevado de Huila, Multitemporal, Clasificación.

ABSTRACT

It has been made a multitemporal analysis, with the final purpose of demonstrating the behavior of the glacier “Nevado del Huila” volcano, through the implementation of five Landsat images of the years 1989, 1999, 2002, 2014 and 2016, where the glacier recoil has been evident in the last 26 years.

Through the revision of applied methodologies in multitemporal studies in order to determine the area of deicing, it was established the use of PCI Geomatics and ArcGis

software, to process the satellite images, applying knowledge of image interpretation and geomatics, also tools were implemented for atmosphere correction, clipping, panshar, supervised classification, filters, and different algorithms, acquiring the classification of each one of the coverings with emphasis in the area of the glacier, to later convert the raster data to vector, in order to calculate the glacier area, data tendency and rate change, To finally analyze the behavior of the glacier area for each of the years studied.

With the application of the software and tools previously described, we arrived to the result that the regression of the glacier for the period of 1989 to 2016 was 61% of its area, equivalent to a loss of 11.73 km².

Keywords: Glacier, Recoil, Volcán Nevado de Huila, Multitemporal, Classification.

INTRODUCCION

El Volcán Nevado del Huila se ubica en los departamentos del Cauca, Huila y Tolima, es el segundo nevado más grande en área de Colombia y su altura de 5364 msnm lo constituye como el punto más alto de la cordillera de los Andes, además conforma uno de los cuatro nevados que se localizan sobre estructuras volcánicas, clasificadas como activas, su conservación es considerada estratégica ya que abastece las dos cuencas más importantes del país (Cuenca alta del Río Magdalena y Cuenca alta del Río Cauca) catalogándola como una estrella hídrica del macizo colombiano.

La tendencia del cambio climático, asociada al incremento de gases de efecto invernadero, sugieren en forma muy específica impactos en la región andina consistentes con las evidencias encontradas al retroceso de los glaciares y la tendencia a desaparecer apresuradamente, si continúan las condiciones climáticas intensificadas por la actividad antrópica, no obstante el Volcán Nevado del Huila registró para el año 2005 una tasa de pérdida en su área de 0.7% anual, la menor de los glaciares, lo que haría de este nevado el más duradero de Colombia.

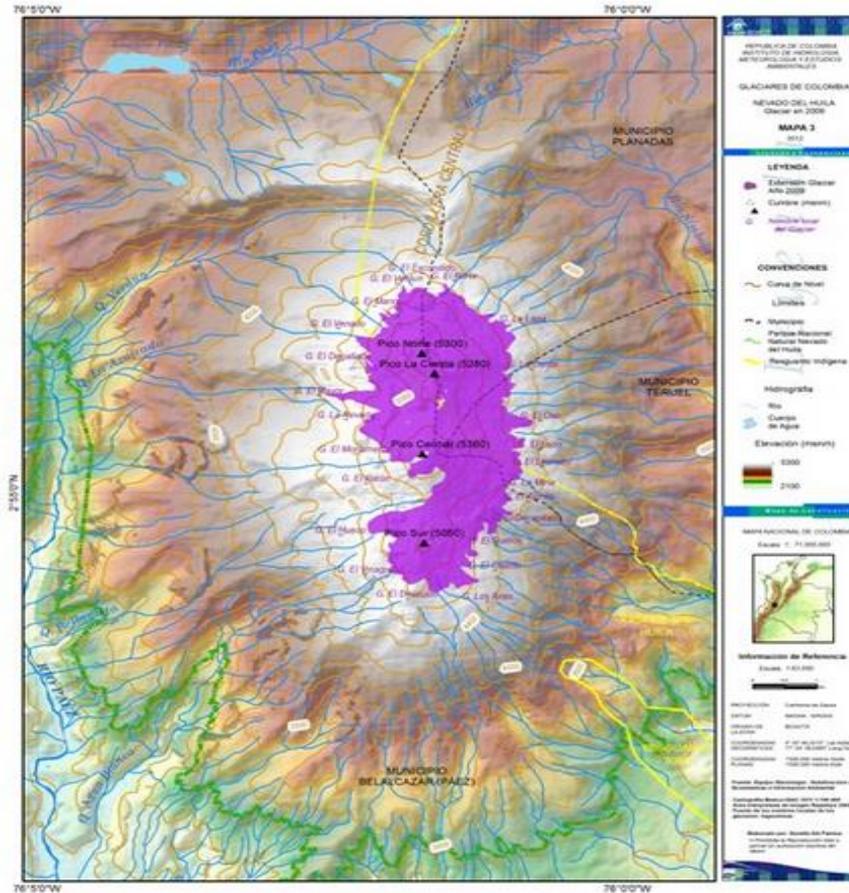
Los estudios glaciares realizados en el Volcán Nevado del Huila son pocos y han sido apoyados principalmente con distintas metodologías, utilizando fotografías aéreas o imágenes de satélite, debido a la dificultad de acceso al glaciar.

En el presente estudio, se realizó un análisis multitemporal del Volcán Nevado del Huila, con el fin de determinar el comportamiento del glaciar, para el periodo comprendido en los últimos 26 años (1989 – 2016).

1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El centro del glaciar del Volcán Nevado del Huila se localiza en las coordenadas geográficas 2°55´ latitud norte, 76°03´ longitud oeste, como se muestra en el mapa 1. Su cumbre central se encuentra a 5364 msnm, este punto no solo es la cima más

alta del Volcán Nevado del Huila, es también la principal altura de los Andes colombianos [1].



Mapa 1. Ubicación del Volcán Nevado del Huila.
Fuente: IDEAM, 2012 [1].

El área del glaciar hace parte de diferentes territorios superpuestos: el resguardo Wila del pueblo Nasa, los municipios de Paez en el departamento del Cauca, Teruel y Planadas en el departamento del Huila; y el área protegida del Parque Nacional Natural Nevado del Huila [1].

El Volcán Nevado del Huila es el segundo glaciar más grande del país, después del Cocúy, su ubicación es específica a diferencia de la mayoría de volcanes, para el año 2005 el Volcán nevado del Huila registraba una tasa de pérdida en su área de 0.7% anual, la menor de los glaciares, lo que haría de este nevado el más duradero de Colombia, de mantenerse en las actuales condiciones climáticas [3].

En la actualidad, el Volcán Nevado del Huila se encuentra en actividad, presenta un cráter formado durante la erupción del 20 de noviembre de 2008. Está conformado en su cima por cuatro picos, alineados en dirección N-S denominados Norte, cresta, Central y Sur [1].

2. PROBLEMÁTICA

El cambio climático ha sido un factor que ha tomado mayor relevancia en los últimos años, debido a los aumentos y descensos de temperatura que trajeron como consecuencias las glaciaciones, redistribución de especies vegetales y animales, sedimentación y cambios del nivel del mar.

Así mismo, a partir del último avance glaciar (entre los años de 1600 y 1850), conocida como la pequeña edad Glacial o Neoglaciación, los glaciares han ido en retroceso. En la década de los cuarenta se presentó una anomalía térmica mundial que se reflejó en los glaciares colombianos, de acuerdo a las investigaciones por E. Kraus para la Sierra Nevada del Cocuy, donde observó un fuerte retroceso entre 1948-1958 [2].

Por lo tanto, los glaciares colombianos son tan solo restos de la última glaciación y con la tendencia a desaparecer apresuradamente, si continúan las condiciones climáticas que no permiten la permanencia de hielo, que a su vez es intensificada por la actividad antrópica; cabe resaltar que esta fusión se debe a que se está pasando por un proceso interglaciar, que está siendo acelerado por el incremento de la emisión de gases efecto invernadero producidos por las diferentes actividades humanas como industriales, económicas (minería, agricultura, forestales) y cotidianas (transporte).

Adicionalmente, de los seis glaciares o nevados¹, el Volcán Nevado del Huila es uno de los cuatro que están sobre estructuras volcánicas, clasificadas como activas (volcanes – nevados).

El Volcán Nevado del Huila es un área protegida que se encuentra dentro de la zona declarada por la Unesco como reserva de la Biósfera, esta a su vez posee el mayor relicto glaciar de la cordillera central. Es un área estratégica ya que abastece las dos cuencas más importantes del país (Cuenca alta del Río Magdalena y Cuenca alta del Río Cauca) catalogándola como una estrella hídrica del Macizo Colombiano, que aporta bienes y servicios ambientales representados en ecosistemas de Páramo, subparamo, bosque Andino y altoandino, favoreciendo así la presencia de especies de flora y fauna [3].

El Volcán Nevado del Huila mostró una tendencia al deshielo durante la segunda mitad del siglo XX, evidencia representada en el retroceso del límite inferior del glaciar y una pérdida de altura promedio de 14,5 metros, debido a la pérdida en su espesor [1].

¹ Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental) Volcán Nevado del Ruiz (Cordillera Central), Volcán Nevado Santa Isabel (Cordillera Central), Volcán Nevado del Tolima (Cordillera Central) y

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para establecer la regresión del área del glaciar del Volcán Nevado del Huila, se emplearon cinco (5) imágenes satelitales Landsat de las siguientes fechas: 07/08/1989, 10/07/1999, 14/10/2002, 29/03/2014 y 14/01/2016.

La información obtenida a partir de las imágenes satelitales, permite establecer el área del retroceso del glaciar, sin embargo, no determina el espesor de la masa glaciar que se perdió, información relevante para calcular, junto con el área el volumen total de nieve existente. Así mismo, dichas fluctuaciones formidables que se presenten en los glaciares, se consideran una de las manifestaciones más evidentes del cambio climático.

Teniendo en cuenta que el acceso a estas áreas de alta montaña es complicado, debido a las condiciones climáticas, como a las mismas condiciones de actividad volcánica, no son siempre las mejores en la mayoría de las épocas del año, lo que restringe el trabajo en campo, por ende la importancia del uso de otras alternativas como la interpretación de imágenes para el cálculo de áreas de cobertura glaciar; como se muestra en la Figura 1, donde se detalla la metodología empleada:



Fig. 1. Metodología
Fuente: Elaboración Propia, 2016.

3.1. DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

Las imágenes de satélite utilizadas son Landsat 4, 5, 7 y 8 a partir de la USGS (United States Geological Survey) - EarthExplorer, correspondientes al satélite Landsat TM y ETM, las cuales presentan 7 y 11 bandas espectrales.

Tabla 1. Imágenes Landsat utilizadas

Imagen	Fecha	Resolución Multiespectral	Identificador	Data Type Level 1
LC80090582016014LGN00	14/01/2016	30 m	Landsat_8	L1T
LC80090582014088LGN00	29/03/2014	30 m	Landsat_8	L1T
LE70090582002287EDC00	14/10/2002	30 m	Landsat_7	ETM+ L1T
LT50090581999191CPE07	10/07/1999	30 m	Landsat_5	TM L1T
LT40090581989219XXX06	07/08/1989	30 m	Landsat_4	TM L1T

Fuente: Elaboración propia, 2016.

3.2. OBTENCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT .PIX

Para este proceso se realizó mediante el software PCI Geomatics, donde se cargó el algoritmo para cargar las tres imágenes inferiores a la versión de Landsat 8, así mismo, se revisó que todas las imágenes cuenten con un sistema de proyección, para este caso WGS_84_UTM_zone_18N, por lo tanto no hubo la necesidad de georeferenciarlas y se procedió a crear el .PIX para cada imagen, con el fin de visualizar en un solo archivo las bandas de cada imagen.

Así mismo, las bandas utilizadas fueron:

Banda 1 Azul: (0.45 – 0.52). Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

Banda 2 Verde: (0.52 – 0.60). Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas, y al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda 3 Roja: (0.63 – 0.69). Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda 4 IR cercano: (0.76 – 0.90). Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda 5 IR medio: (1.55 – 1.75). Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

Banda 7 IR medio: (ligeramente más largo que la banda 5): (2.08 – 2.35). Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal [4].

Las combinaciones de bandas útiles para este estudio fueron la de color natural para identificar la zona de interés, y para extraer las áreas de nieve mediante el uso de un método de clasificación supervisada, se empleó la combinación 453 para Landsat 4, 5 y 7 y una combinación 564 (No. 6 = banda7) para Landsat 8, resultando una característica firma espectral en color magenta [7], facilitando la identificación de esta cobertura:

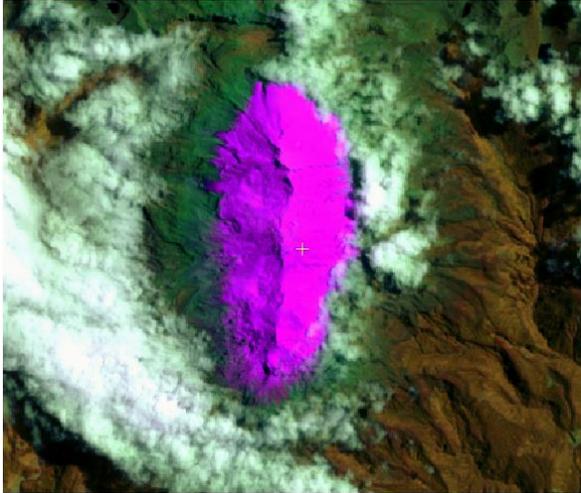


Imagen 1. Combinación 453 del año de 1989
Fuente: Elaboración propia, 2016.

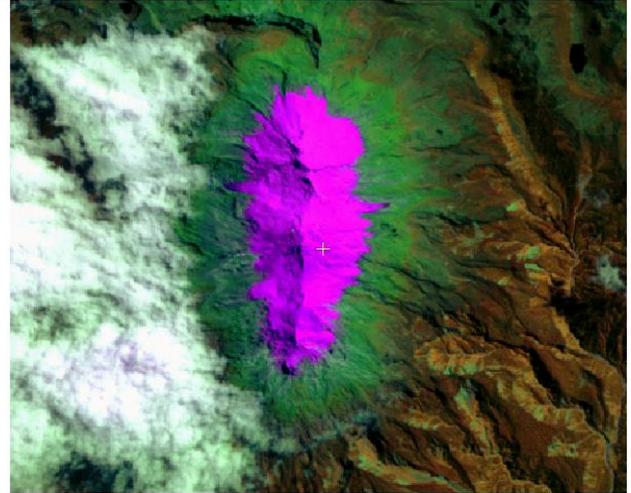


Imagen 2. Combinación 453 del año de 1999
Fuente: Elaboración propia, 2016.



Imagen 3. Combinación 453 del año de 2002
Fuente: Elaboración propia, 2016.

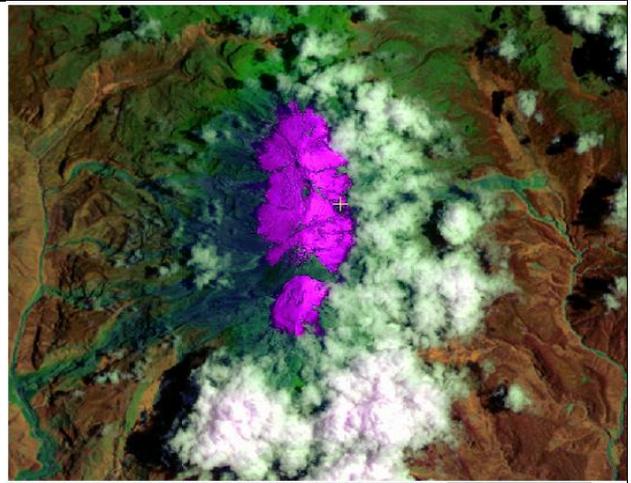


Imagen 4. Combinación 564 del año de 2014
Fuente: Elaboración propia, 2016.

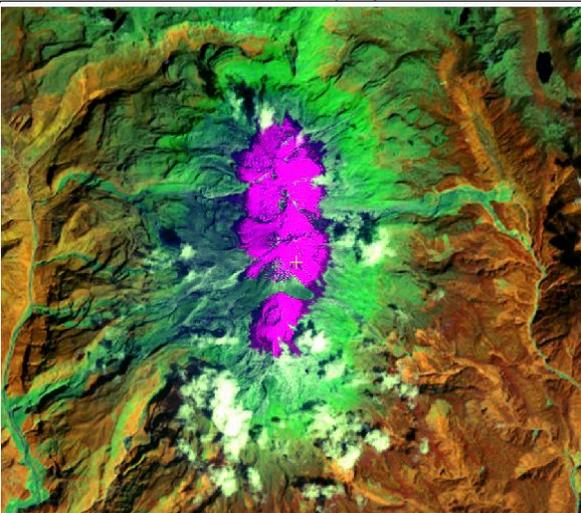


Imagen 5. Combinación 564 del año de 2016
Fuente: Elaboración propia, 2016.

3.3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Para este proceso se emplearon las herramientas del software PCI Geomatics, para este paso la imagen debe estar en formato .PIX, con las bandas del mismo valor de bit y la misma resolución.

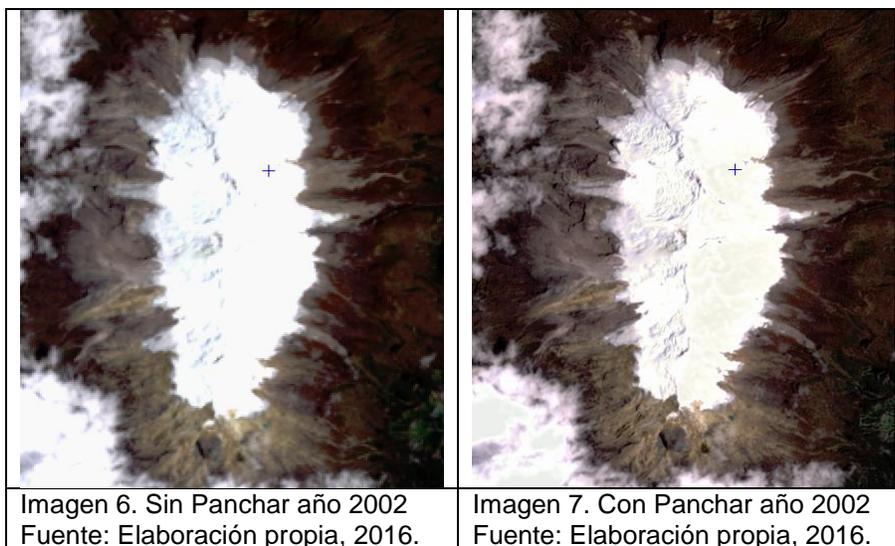
Posteriormente se procede a configurar los parámetros de la corrección atmosférica:

- El tipo de sensor, se debe verificar el sensor de cada imagen.
- La fecha de toma de la imagen.
- La hora de toma de la imagen para calcular el azimut y Cenit Solar.
- Para este caso la atmosfera corresponde a Tropical.

Esta conversión reduce parcialmente el efecto de diferencias en las condiciones de insolación de las escenas y es necesaria para análisis multitemporal [8].

3.4. PANSCHAR

Para este caso se realizó el Panshar para las imágenes Landsat 7 y Landsat 8, ya que tienen la banda pancromática, es decir al realizar dicho procedimiento se mejora la resolución espacial ya que las bandas multiespectrales manejan una resolución de 30 metros, mientras la banda pancromática tiene una resolución de 15 metros, lo cual facilita la clasificación supervisada como se observa en el siguiente ejemplo:



3.5. RECORTE DE LA ZONA

Se empleó la herramienta Clipping del software PCI Geomatics, teniendo en cuenta la misma área para las cinco imágenes, generando el siguiente resultando:

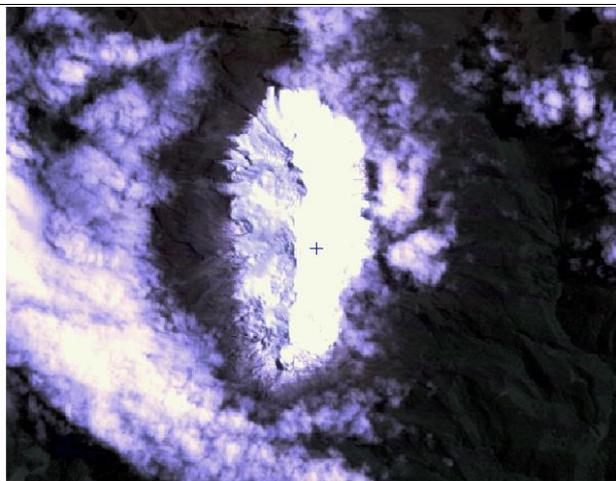


Imagen 8. Recorte de la imagen del año de 1989
(color natural 3,2,1)
Fuente: Elaboración propia, 2016.



Imagen 9. Recorte de la imagen del año de 1999
(color natural 3,2,1)
Fuente: Elaboración propia, 2016.



Imagen 10. Recorte de la imagen del año de 2002
(color natural 3,2,1)
Fuente: Elaboración propia, 2016.



Imagen 11. Recorte de la imagen del año de 2014
(color natural 4,3,2)
Fuente: Elaboración propia, 2016.

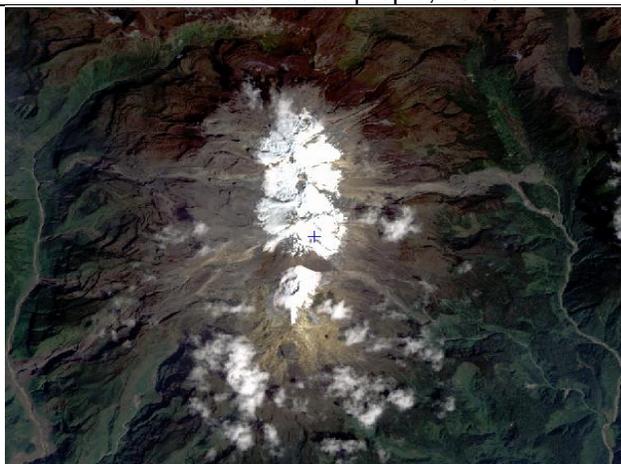


Imagen 12. Recorte de la imagen del año de 2016
(color natural 4,3,2)
Fuente: Elaboración propia, 2016.

3.6. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA Y FILTRO

Para esta clasificación fue necesario identificar las principales coberturas, del área del recorte de la imagen, así mismo, se tuvo en cuenta la Clasificación Corine Land Cover para Colombia a escala 1:500.000², empleando la identificación de la cobertura hasta el tercer nivel, de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las coberturas empleadas

Cobertura	Código
Zonas glaciares y nivales	3.3.5.
Afloramientos rocosos	3.3.2.
Herbazal	3.2.1.
Ríos	5.1.1.
Lagunas, lagos y ciegas naturales	5.1.2.

Fuente: Elaboración Propia, 2016

La cobertura de clasificación “Zonas glaciares y nivales” comprende el área de interés y objetivo de estudio que es el área glaciar del Volcán Nevado del Huila.

Así mismo, se consideró pertinente adicionar una nueva cobertura llama nubes, debido a que el área del recorte se vio influenciada por esta, por tal razón se empleó la siguiente clasificación con los mismos colores que se emplean para este tipo de coberturas según Corine Land Cover para Colombia a escala 1:500.000.

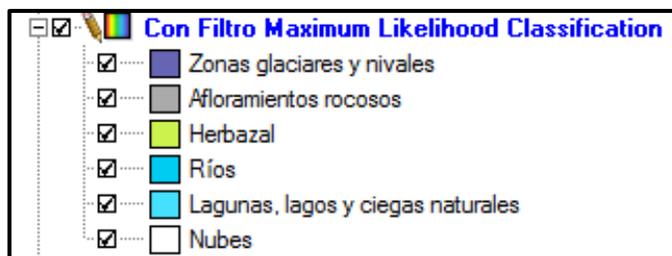


Fig. 1. Coberturas empleadas en la Clasificación Supervisada

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

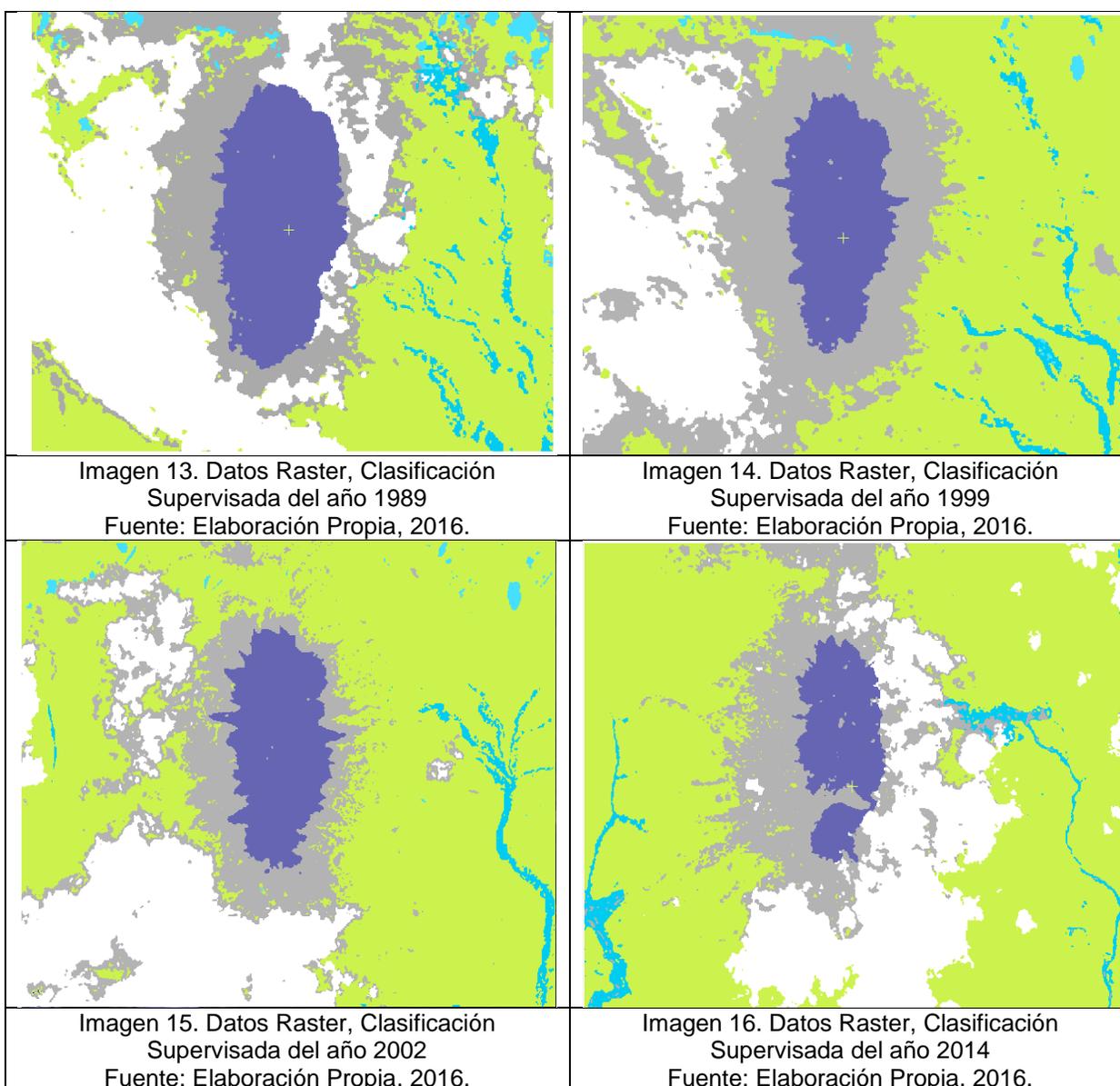
Posterior a la identificación de las coberturas anteriores y toma de las respectivas áreas de entrenamiento, se procedió a ejecutar la clasificación supervisada, para este caso la que mejor respuesta y apreciación visual tenía de acuerdo a las coberturas identificadas, fue mediante el algoritmo de Maximum Classification, con el que se obtuvo los mayores porcentajes de clasificación de píxeles, de acuerdo a las áreas de entrenamiento definidas y los mayores porcentajes precisión general [5], con un valor superior al 90%.

² IGAC et al. Propuesta de nomenclatura para coberturas de la tierra como insumo para el mapa de ecosistemas de Colombia, Basado en el esquema de Corine Land Cover modificado para Colombia a 1:500.000.

Posteriormente, se procedió a realizar la edición de la coberturas con mayor detalle en la de Zonas glaciares y nivales, ya que es la cobertura de interés, con el fin que sea lo más fiel a la realidad, empleando máscaras y finalmente se aplicó un filtro [3], ya que este ayuda homogeneizar el área y brinda también suavidad al área clasificada, para este análisis se aplicó el filtro mode, size 3 de paso bajo.

Adicionalmente, para el año 2014 fue necesario emplear una máscara editada con una imagen Landsat del 24/01/2014, cuyo resultado se sobrepuso a la clasificación supervisada de la imagen del 29/03/2014, con el fin de presentar un área lo más fiel a la realidad, debido a que la imagen implementada del 29/03/2014, presentaba nubosidad en la parte norte lo cual distorsionaba el área final.

Obteniendo así, las siguientes clasificaciones supervisadas:



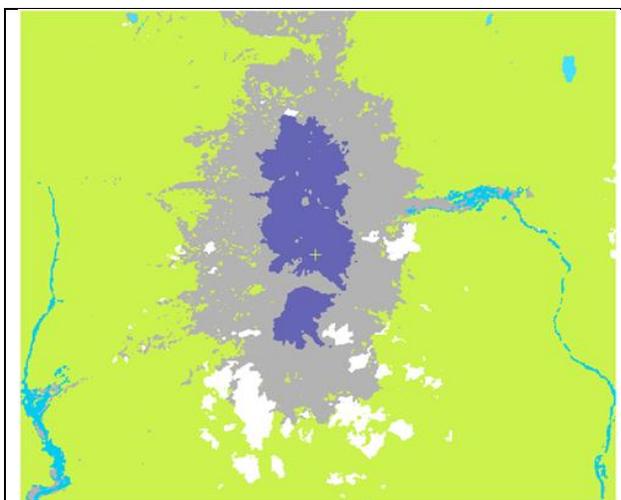


Imagen 17. Datos Raster, Clasificación Supervisada del año 2016
Fuente: Elaboración Propia, 2016.

3.7. CONVERTIR FORMATO RASTER A VECTOR

Para este proceso, se procedió a emplear el resultado obtenido en la Clasificación supervisada y se exportó la información a formato Tiff en el software PCI Geomatics, luego con el software ArcGis se procedió a convertir los datos en tipo raster (formato Tiff) a tipo vector, generando una capa con geometría de polígono (Shapefile) para calcular el área de las coberturas.

Para este resultado ya existe una clasificación preliminar de acuerdo a lo que se realizó anteriormente en el software PCI Geomatics, es decir, se volvió a organizar la información y colocar los valores de los colores y nombres de las respectivas coberturas de acuerdo a la clasificación de Corine Land Cover para Colombia a escala 1:500.000.

3.8. CÁLCULO DEL ÁREA DEL GLACIAR

Para el cálculo del área fue necesario tener la información organizada por nombre de cobertura, luego se creó una nueva columna en la tabla de atributos de cada año y se procedió a calcular la geometría del área en Km² de cada uno de los polígonos obtenidos, con el fin de emplear la herramienta Summarize por tipo de cobertura, teniendo como objetivo para este estudio las “Zonas glaciares y nivales”, donde se obtuvo el área por cada uno de los años de estudio, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Area de Zonas glaciares y nivales en los años 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016

Año	Área Km ²	Año	Área Km ²
1989	19,15	2014	8,24
1999	13,76	2016	7,41
2002	11,80		

Fuente: Elaboración Propia, 2016

3.9. REGRESIÓN GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA EN LOS PERIODOS 1989, 1999, 2002, 2014 Y 2016

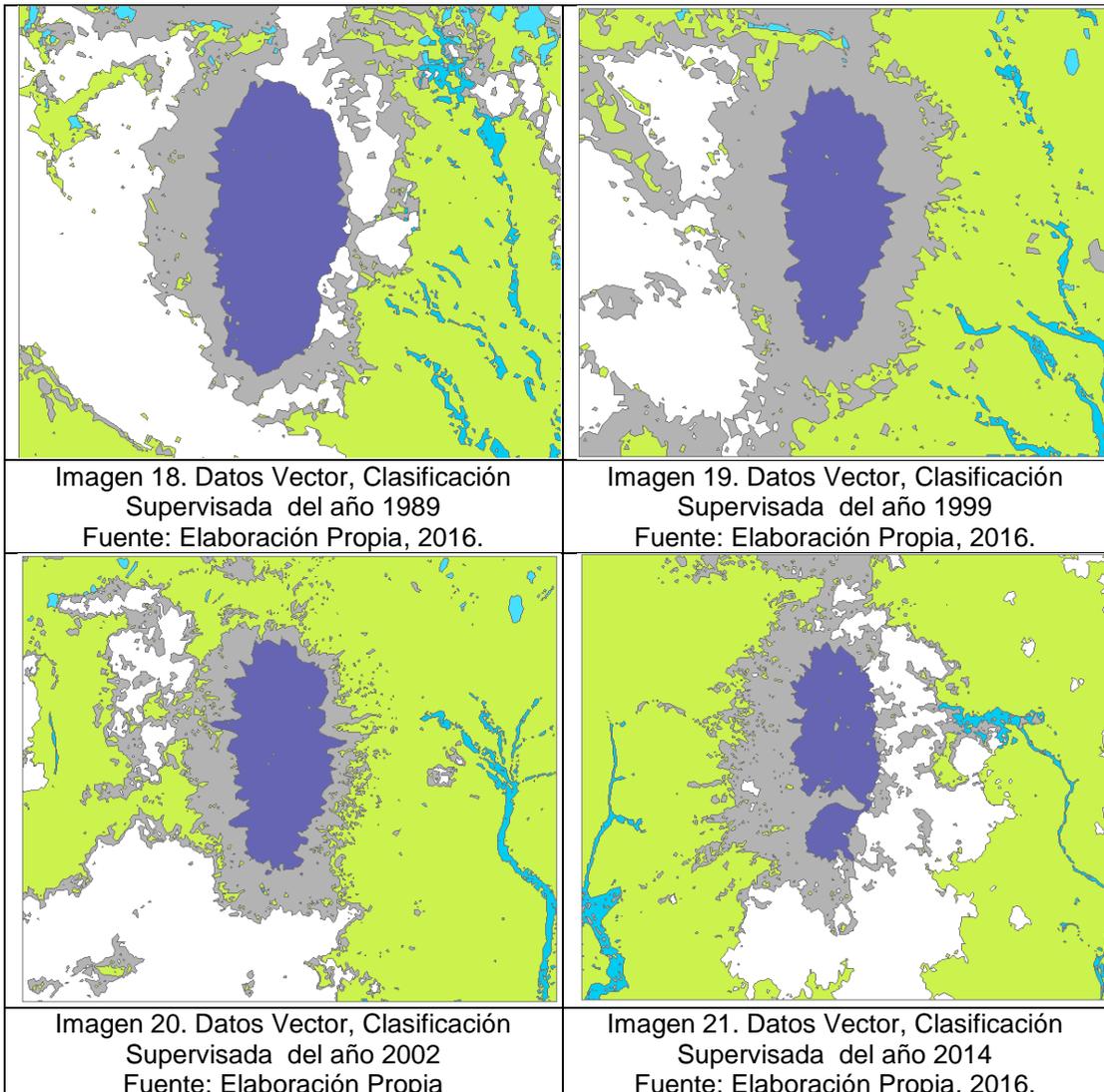
Se procedio a realizar los calculos, con el fin de observar la perdida de glaciacion en el periodo comprendido desde 1989 hasta 2016 y entre cada uno de los periodos analizados, de acuerdo al resultado de las areas obtenidas de la clasificacion supervisada.

Tambien se procedio a revizar bibliografia con el fin de comparar los datos obtenidos, con los registrados por otros autores.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA

De acuerdo a clasificación supervisada realizada para el Volcán Nevado del Huila, se observa el resultado en formato vector de cada uno de los años de estudio:



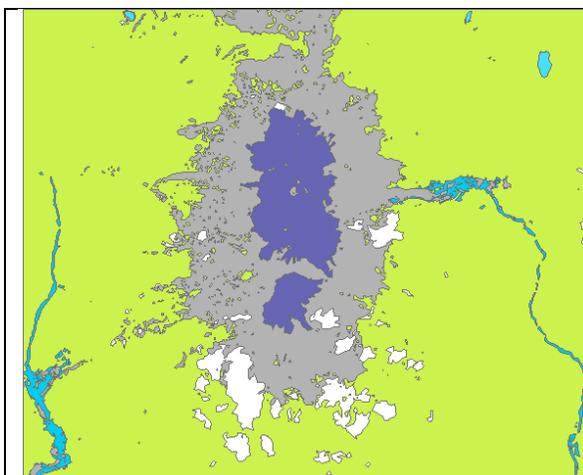


Imagen 22. Datos Vector, Clasificación Supervisada del año 2016
Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Para observar la regresión glaciaria del Volcán Nevado del Huila en los años de 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016, fue necesario obtener las áreas de superficie glaciaria para cada año y posteriormente se calculó las tasas de cambio anual, para cada uno de los periodos.

Para calcular la tasa de cambio anual se empleó la Ecuación (1)

$$r = \left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \right] 100 \quad (1)$$

r = Tasa de cambio anual

N₀ = Superficie de la cobertura glaciaria en el tiempo "0"

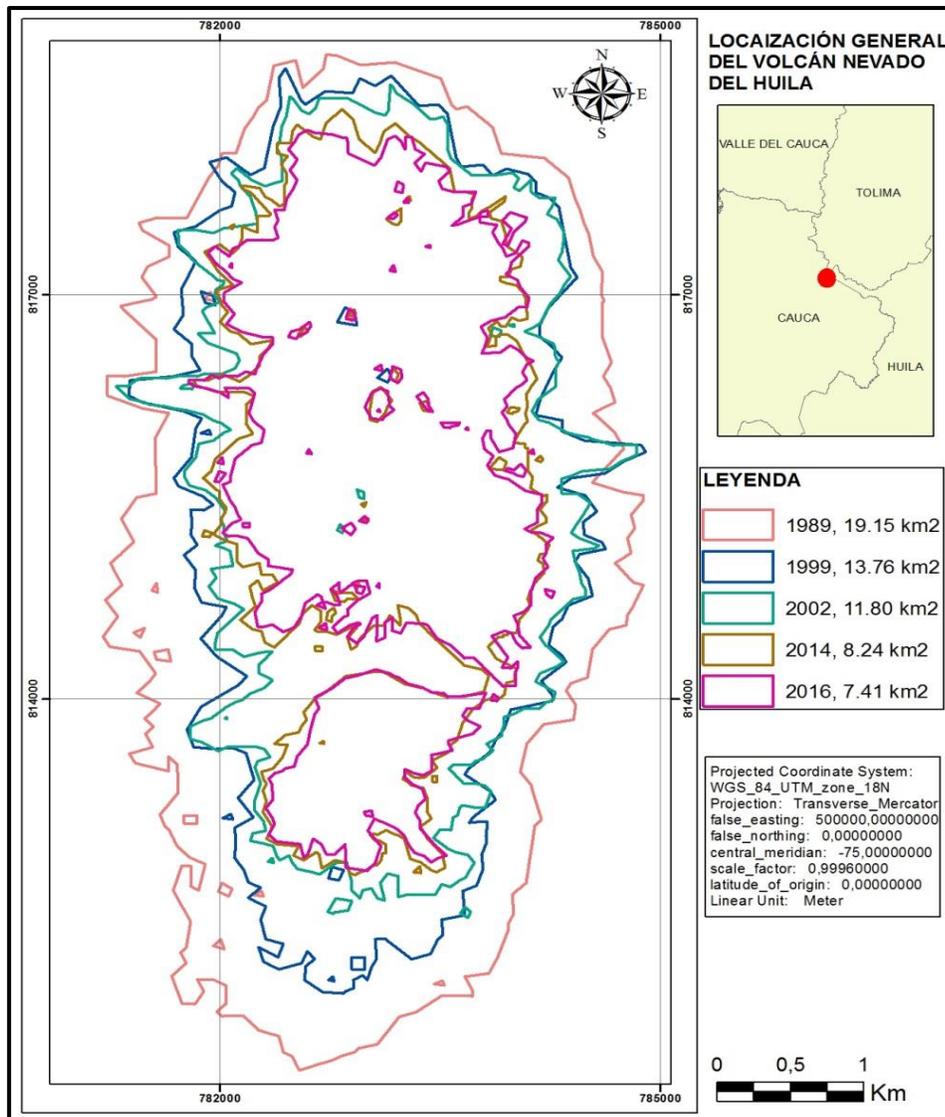
N = Superficie de cobertura en el tiempo 1

t = Diferencia del tiempo en años [6].

Tabla 8. Retroceso glaciario en el Volcán Nevado del Huila 1989 - 2016.

Año	Área Km²	Perdida entre Periodos Km²	Pérdida Anual Km²	Tasa de cambio Anual %
1989	19,15			
		5,39	0,54	-3,25
1999	13,76			
		1,96	0,65	-4,98
2002	11,80			
		3,57	0,30	-2,95
2014	8,24			
		0,82	0,41	-5,14
2016	7,41			

Fuente: Elaboración propia, 2016.



Mapa 2. Retroceso glaciar en el Volcán Nevado del Huila 1989, 1999, 2002, 2014 y 2016
Fuente: Elaboración propia, 2016.

Para la tasa de cambio promedio anual, se obtuvieron valores negativos que confirma la innegable retracción del glaciar [6], en cada uno de los cuatro periodos (1989-1999, 1999-2002, 2002-2014, 2014-2016), identificando la mayor la tasa de cambio anual para el periodo más reciente y la menor tasa coincide con el menor valor de pérdida anual de nieve en Km², así mismo, el valor promedio obtenido en los últimos 26 años (1989-2016) corresponde a una tasa de -4,08 % anual de acuerdo a los valores anteriores, observando una mayor afectación del área en la parte sur del Volcán Nevado del Huila, posiblemente por la fragmentación que sufrió el glaciar, que se evidencio en la imagen del año 2014.

De persistir la actual tendencia de pérdida de área entre 2 y 5% anual, cifra que coincide con la tasa de cambio anual reportada para este estudio de -4,08 %, se

calcula que en un plazo de tres a cuatro décadas no habrá glaciares en Colombia o una mínima masa permanecerá en las cumbres más altas y húmedas [9].

Para el periodo comprendido entre los años 1989 al 1999 presenta el segundo valor más alto respecto a la pérdida anual en (km²) de glaciar, el cual coincide posiblemente con el fenómeno “el niño” que afectó fuertemente los nevados durante los años 1997 y 1998, vulnerables a la radiación solar directa [10], igualmente también al sismo ocurrido en 1994 con magnitud de 6,4 causando deslizamientos superficiales [11].

Para el periodo 1999 al 2002 se obtuvo el dato mayor de pérdida anual en (Km²) lo que posiblemente está relacionado con un aumento de la temperatura media del orden de 0.13°C/década para 1971-2000 para Colombia (incluyendo en este periodo el segundo valor de pérdida anual en Km² de glaciar en 1989-1999) [12]. También se debe tener en cuenta que en el año 1999 se presentó el fenómeno climático de la niña, adicionalmente entre los años 2000 al 2002 se presentó un aumento de temperatura a nivel nacional significativo comparado con el año de 1999 [13].

En cuanto al periodo 2002 al 2014 fue el periodo con menor pérdida área en Km² sin embargo en este periodo se presentaron diferentes sucesos que pueden explicar dicho comportamiento, como por ejemplo los eventos eruptivos de 2007 y 2008 que provocaron fisuras de gran tamaño provocando la caída de bloques de hielo, siendo derretidas por la actividad del volcán paulatinamente, lo que explicaría la fragmentación evidenciada en el año 2014, después de los eventos eruptivos, se han presentado recargas de nieve a una intensidad baja; además el fenómeno de la niña que se presentó en los años 2010 a 2012, en el cual los glaciares recuperaron y estuvieron cubiertos por un mayor espesor de nieve [1].

Finalmente, para el periodo 2014 a 2016, se vio influenciado por la presencia del fenómeno del niño en el 2015-2016, reportando para el mes de noviembre de 2015 como uno de los fenómenos más fuertes desde 1950 [14].

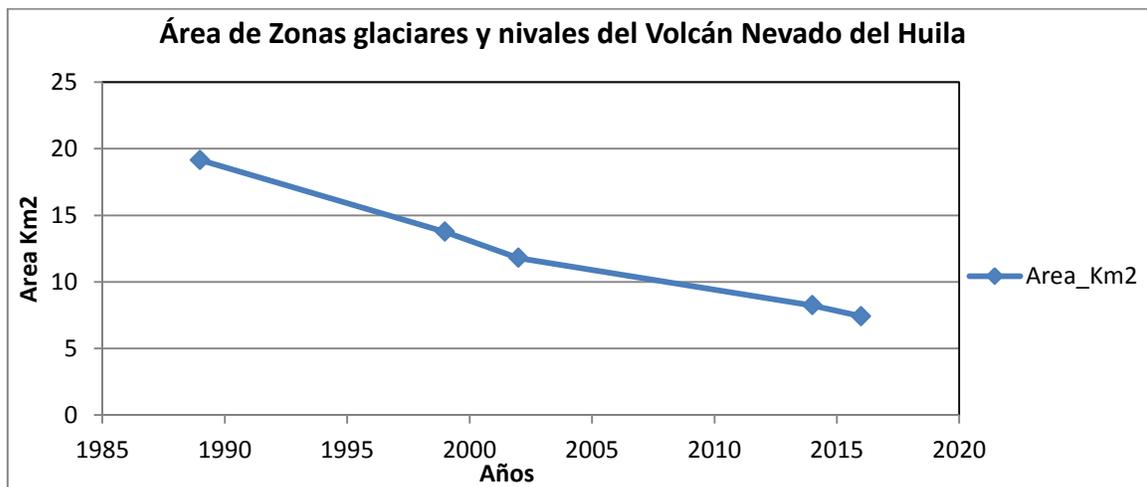


Fig. 2. Área de Zonas glaciares y nivales del Volcán Nevado del Huila en los años de estudio
Fuente: Elaboración Propia, 2016.

De acuerdo a los resultados obtenidos para estos últimos 26 años (1989-2016), existe una pérdida del área del glaciar de 11,73 km², es decir la cobertura de glaciar perdida corresponde aproximadamente al 61%.

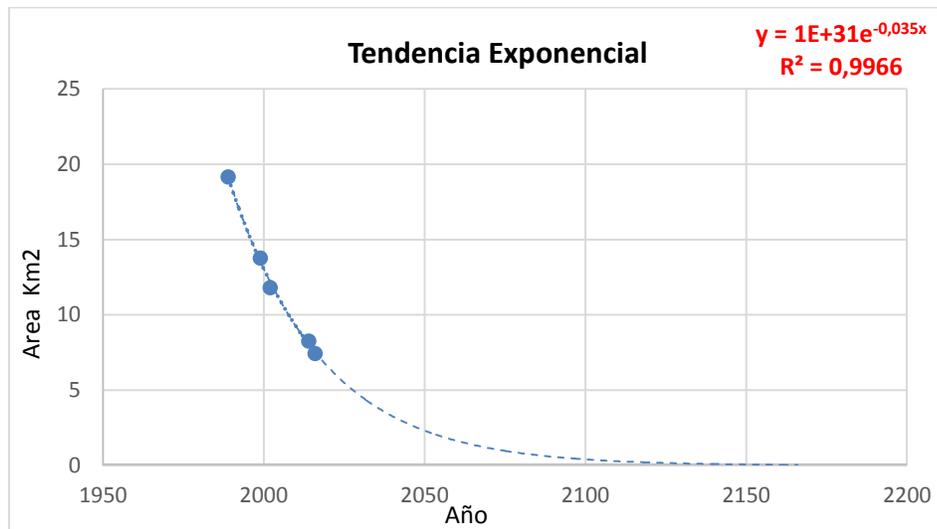


Fig. 3. Tendencia exponencial del valor de área de Zonas glaciares y nivales del Volcán Nevado del Huila en los años de estudio
Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Para proyectar el comportamiento del área de nieve a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta los valores de los cinco años evaluados correspondientes al periodo de 1989 a 2016, y de acuerdo a su tendencia, los datos se adaptaron a una tendencia exponencial, ya que su coeficiente de correlación es de 0.99 el mejor valor comparado con las demás, así mismo, manteniendo y controlando las variables climáticas y ambientales, como la temperatura, precipitaciones, fenómenos climáticos, interacción de los factores volcánicos entre otras, que influyen en el retroceso glaciar, y que pueden explicar la dinámica de la superficie glaciar [6], se proyectaría una pérdida total de la nieve del Volcán Nevado del Huila cuando la función tiende a cero, es decir en 98 años aproximadamente.

Se ha calculado la posible desaparición de los glaciares colombianos, donde se expresa el plazo de existencia del Volcán Nevado de Huila, con base en las huellas dejadas por el hielo al final de la era neoglacial, fotografías aéreas de varias décadas y datos de campo, que la época aproximada para la desaparición de este, es alrededor del año de 2110 [2], esta tendencia está relacionada con los datos reportados en este estudio donde dicho resultado se aproxima al año de 2114.

4.2. REGISTRO DE ÁREAS GLACIARES CALCULADAS EN OTROS ESTUDIOS, PARA EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE LOS AÑOS DE 1850 Y 2010.

Tabla 9. Retroceso glaciar en el Volcán Nevado del Huila 1850 -2010.

Año	Área (Km ²)	Perdida entre Periodos (Km ²)	Pérdida Anual (Km ²)	Porcentaje de área perdida de 1850-2010
1850	33,7			71%
		16,2	0,15	
1959	17,5			
		1,2	0,20	
1965	16,3			
		0,9	0,06	
1981	15,4			
		1,5	0,17	
1990	13,9			
		0,6	0,10	
1996	13,3			
		0,35	0,06	
2001	12,95			
		2,15	0,39	
2007	10,8			
		1,1	0,20	
2010	9,7			

Fuente: IDEAM, 2012 [1].

4.3 REGISTRO DE ÁREAS GLACIARES CALCULADAS EN OTROS ESTUDIOS, RELACIONADOS CON LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE ESTUDIO, PARA EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE LOS AÑOS DE 1989 Y 2016.

En la tabla 10 se relacionan los valores de las aéreas obtenidas en este estudio, con respecto a los datos registrados en otros estudios, con el fin de observar su relación y la regresión glaciar del Volcán Nevado del Huila.

Tabla 10. Retroceso glaciar en el Volcán Nevado del Huila 1989 -2016.

Año	Área Km2	Perdida entre Periodos (Km2)	Pérdida Anual (Km2)	Porcentaje de área de pérdida de 1989-2010
1989	19,15			61%
		5,25	5,25	
1990	13,90			
		0,60	0,10	
1996	13,30			
		-0,46	-0,15	
1999	13,76			

Año	Área Km2	Perdida entre Periodos (Km2)	Pérdida Anual (Km2)	Porcentaje de área de pérdida de 1989-2010
		0,81	0,40	61%
2001	12,95			
		1,15	0,10	
2002	11,80			
		1,00	0,20	
2007	10,80			
		1,10	0,37	
2010	9,70			
		1,46	0,37	
2014	8,24			
		0,82	0,41	
2016	7,41			

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

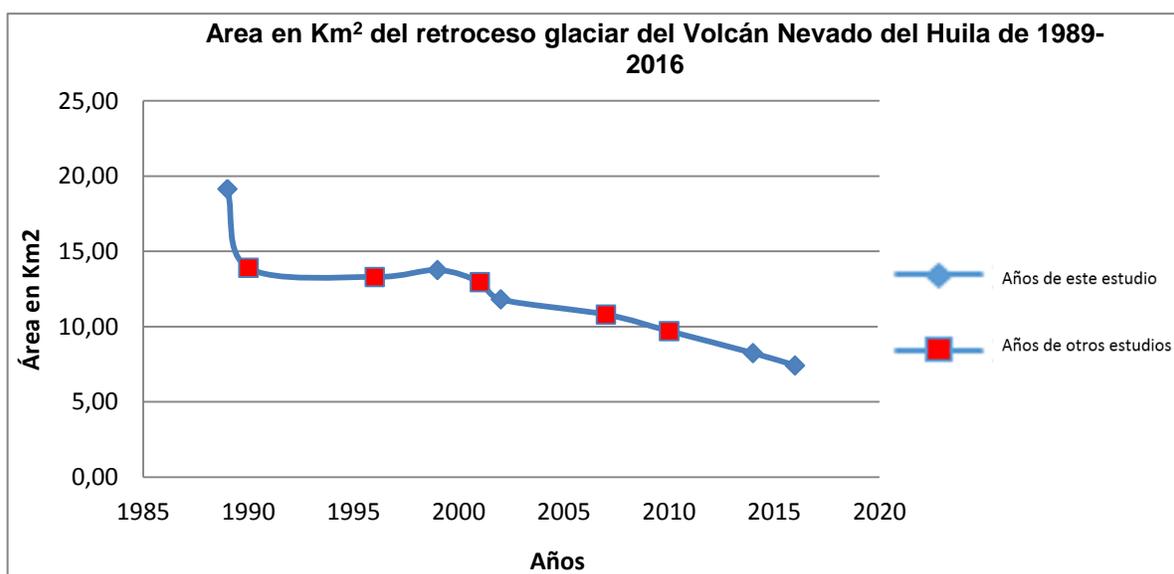


Fig. 3. Registro de áreas calculadas en otros estudios relacionados con los datos reportados este estudio para periodo comprendido entre los años de 1989 y 2016

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Se observa que al cruzar los datos obtenidos en este estudio, con las áreas recopiladas por el IDEAM [2], para el periodo de 1989 a 1999 estos coinciden, sin embargo para el primer periodo hay un cambio abrupto, debido a que la fuente de esta información está basada en el estudio de Flórez (1992), el cual se realizó con base en fotografías aéreas, y para el estudio de Pulgarin et al. (1996 y 2007), basado en restituciones de la topografía de las áreas glaciares de este nevado, el cual se realizó también a partir de fotografías aéreas [9]. Así mismo, estos valores de áreas reportados en estos estudios tienen un nivel de detalle mayor que el resultado obtenido con este estudio, debido a que la resolución espacial de las imágenes Landsat es de 30 m.

Así mismo, se observa una mayor relación de los datos desde el año 2001 hasta la fecha más reciente, esto debido a que la fuente de esta información son imágenes satelitales; Landsat TM para el 2001, Landsat ETM y Quick bird para el año 2007 y RapidEye para el año 2010, la mayoría coinciden con las imágenes de satélite empleadas para este estudio (Landsat), por ende hay mejor tendencia de relación, incluso con las demás imágenes satelitales que tienen una resolución de media a alta.

5. CONCLUSIONES

- El resultado del análisis multitemporal realizado con imágenes satelitales Landsat, permite observar el retroceso en el tiempo del Volcán Nevado del Huila, con una tasa de cambio anual promedio de -4,08%, valor negativo que confirma la innegable disminución del glaciar.
- El retroceso glaciar es un proceso natural dentro de la amplia historia climática terrestre, pero está fuertemente influenciado y acelerado en las últimas décadas por el aumento térmico de la atmósfera, asociado a la acumulación de gases de efecto invernadero, incluyendo además la interacción con el sistema volcánico, debido a que la del masa glaciar se vio especialmente afectada de manera negativa.
- Para el periodo de estudio correspondiente a los años de 1989 a 2016, se observa una pérdida del área del glaciar del Volcán Nevado del Huila de 11,73 km², es decir que en estos 26 años se ha perdido más de la mitad del glaciar con un 61%.
- La tendencia que mejor se ajustó, de acuerdo a los valores de áreas reportadas para cada uno de los cinco años (1989, 1999, 2002, 2014 y 2016) fue la tendencia exponencial, en donde se proyectaría una pérdida total del área glaciar del Volcán Nevado del Huila aproximadamente en 98 años, siempre y cuando se mantengan las variables climáticas y ambientales, que pueden afectar dicho comportamiento.
- De acuerdo a las áreas de glaciar obtenidas para cada uno de los años de estudio, se brinda un panorama del comportamiento del Volcán Nevado de Huila en los últimos 26 años, cabe resaltar que el nivel de resolución no es un obstáculo para evidenciar la regresión del glaciar, por el contrario brinda una perspectiva para tomar futuras acciones, como implementar información cartográfica más detallada, con el fin de continuar con la toma de decisiones, e implementar acciones para el manejo adecuado de los recursos naturales, que logren ayudar a perdurar un poco más en el tiempo este y los demás glaciares de Colombia.

REFERENCIAS

- [1] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá, D.C., Colombia: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, pp. 344.

- [2] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (1997). *Los Glaciares de Colombianos, Expresión de Cambio Climático Global*. Bogotá, D.C., Colombia, pp. 19.
- [3] Unidad Administrativa Espacial del Sistema de Parques Nacionales Naturales - UAESPNN. (2007). *Plan de manejo Parque Nacional Natural Nevado del Huila*. Popayán, Colombia: Proyecto PNUD col 01 g 31 biomacizo, pp. 367.
- [4] Peña, 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*. Facultad de ingeniería, Especialización en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- [5] Gómez C. y Calderón C. (2012). *Estudio multitemporal con imágenes landsat tm 5 de la variación de la cobertura del suelo de la región circundante a una zona de lahar volcánico: Caso de estudio Volcán Nevado del Ruiz (1985-2011)*. Facultad de ingeniería, Especialización en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- [6] Colonia, D.F. y Torres, J.E. (2012, Mayo). "Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Ilanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987-2007". Presentado en *Proceedings of the 4th GEOBIA*, Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Herrera G. y Ruiz J. (2009). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*, Volumen (13), pp. 27-36.
- [8] Pitte P, Ferri L. y Espizua L. (2009, Abril). "Aplicación de sensores remotos al estudio de glaciares en el Cerro Aconcagua". Presentado en *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil.
- [9] INGEOMINAS - Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010). *Glaciares, nieves y hielos de América Latina Cambio climático y amenazas*. Bogotá, D.C., Colombia: Impresión Digital. pp. 343.
- [10] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá, D.C., Colombia, pp. 81.
- [11] INGEOMINAS - Instituto Colombiano de Geología y Minería (1994). Localización Preliminar de Sismos Ubicados en el territorio Colombiano. *Boletín de sismos*. Volumen (2), pp. 1-29.
- [12] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Escenarios de cambio climático*. En: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>.
- [13] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia (años y décadas más calientes y las más y menos lluviosas). Bogotá, D.C., Colombia: Nota técnica del IDEAM, pp. 26.
- [14] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Continua el fenómeno "el niño" con una tendencia hacia su máxima intensidad En su fase de madurez y se ubica entre uno de los más fuertes desde 1950. Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de variabilidad climática "El Niño" y "La Niña". Volumen (88), pp. 1-7.