

## **ESTIMACIÓN ACTUAL Y FUTURA DEL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE, EN ECUADOR**

**CURRENT AND FUTURE ESTIMATION OF GLACIER RETREAT OF  
NEVADO CAYAMBE, ECUADOR**

---

*Recibido: 29/04/2022 - Aceptado: 11/01/2023*

---

### **Estefanía Belén Cabrera Montenegro**

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables -  
Universidad Técnica del Norte

[ebcabreram@utn.edu.ec](mailto:ebcabreram@utn.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-1219-7798>

---

### **Joe Carlos Vega Tamba**

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables,  
Universidad Técnica del Norte

[jcvegat@utn.edu.ec](mailto:jcvegat@utn.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-4617-0120>

---

---

## **Gabriel Alexis Jácome Aguirre**

Máster en Ingeniería Ambiental - Kyung Hee University.

Docente de la Carrera de Recursos Naturales Renovables de la  
Universidad Técnica del Norte.

gajacomea@utn.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0001-8305-6226>

---

### **Cómo citar este artículo:**

Cabrera, E., Vega, J. & Jácome, G. (Enero - Junio de 2022).  
Estimación actual y futura del retroceso glaciar del nevado  
Cayambe, en Ecuador. Sathiri (18)1, 158-178. <https://doi.org/10.32645/13906925.1197>



## Resumen

Los Andes ecuatorianos experimentaron pérdidas de cobertura glaciaria a causa de factores antrópicos que propician el cambio climático. En ese sentido, el presente estudio tuvo como objetivo cuantificar la pérdida de la cobertura glaciaria del nevado Cayambe ubicado en la provincia de Pichincha en Ecuador para las últimas décadas (1990-2020) mediante imágenes satelitales Landsat, además de identificar cómo estos cambios se relacionan con las tendencias de variabilidad climática y cómo pueden continuar con el pasar del tiempo por medio de una proyección futura. El resultado del cambio en la cobertura glaciaria se obtuvo mediante la digitalización de imágenes satelitales y el cálculo de las áreas de los polígonos resultantes. Se analizaron las tendencias de precipitación y temperatura mediante la prueba de Mann Kendall y su relación con el retroceso glaciario. Con las áreas obtenidas se aplicó la proyección futura del retroceso glaciario y la tendencia de decrecimiento. Como resultado se evidencia que el nevado Cayambe presenta un retroceso de 30.09 % durante los últimos 30 años, debido al aumento de temperatura desde el año 2012. Las tendencias de las variables climáticas no son significativas, sin embargo presentan tendencias crecientes para la temperatura y decrecientes para la precipitación, por lo que tienen una relación del 4 al 7 % con el retroceso glaciario, aunque no es un valor alto, se infiere que si presentan relación. Se estima que para el año 2050, el glaciario tendrá un área de 6.1 km<sup>2</sup> y para el año 2080 desaparecerá. Se puede concluir que el nevado Cayambe se encuentra en retroceso constante con el paso de los años, lo que hace que el impacto del cambio climático sea cada vez más evidente.

**Palabras clave:** Retroceso glaciario, variabilidad climática, proyección futura

## Abstract

The Ecuadorian Andes experienced losses of glacier cover due to anthropic factors that promote climate change. This study aimed to quantify the loss of the glacier cover of Cayambe volcano located in Pichincha, Ecuador for the last decades (1990-2020) through Landsat satellite images. It includes the identification of how these changes relate to trends in climate variability and how they can continue over time through future projection. The result of the change in glacier coverage was obtained by digitizing satellite images and calculating the areas of the resulting polygons. Rainfall and temperature trends were performed using the Mann Kendall test and its relationship with glacier retreat. With the obtained areas the future projection of the glacier retreat and the tendency of decrease were applied. The glacier of Cayambe volcano had a decline of 30.09 % during the last 30 years due to the increase in temperature since 2012. The trends of the climatic variables are not significant, however, they present increasing trends for temperature and decreasing trends for precipitation, so they have a ratio of 4 to 7 % with glacier retreat, although it is not a high value, it is inferred that they are related. By 2050 the glacier will have an area of 6.1 km<sup>2</sup> and by 2080 it will disappear. It can be concluded that this glacier is in constant decline with the variation of the years and the climate change becomes increasingly evident.

**Keywords:** Glacier retreat, climate variability, future projection.

## Introducción

Los glaciares son una de las estructuras geológicas más espectaculares y con una mayor capacidad morfogénica en el mundo debido a la gran diversidad de geoformas que posee y a su presencia dentro del paisaje; además, es muy importante debido a la funcionalidad que presentan como suministro de agua para poblaciones aledañas (Francou et al., 2000). Sin embargo, los glaciares presentan problemas de deshielo que desembocan en una cadena de afectaciones como el desgaste del recurso hídrico, dando paso a fenómenos meteorológicos (Belmonte, 2017; Schoolmeester et al., 2018). El monte Tuyuksu, ubicado en el norte de Tian Shan en Kazajstán y Kirguistán, presenta la mayor pérdida de masa glaciar en la década de 1970 con un valor de 21 % y una tendencia de aumento de temperatura de 1°C/año y precipitación de 11.5 mm/año (Bolch, 2006). El nevado Quelccaya, situado en los Andes peruanos, registra un retroceso de 20 m durante el periodo 1991-1976 (Silverio y Yaquet, 2003). En la Cordillera Oriental de Bolivia, en el período de 1975 al 2006, 376 glaciares redujeron sus coberturas en un 48 % a causa del cambio climático y el aumento poblacional (Soruco et al., 2009). Otras investigaciones han sido analizadas obteniendo resultados poco favorables que indican una pérdida del triple de su cobertura nival desde la década de los ochenta (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007; Francou et al., 2007).

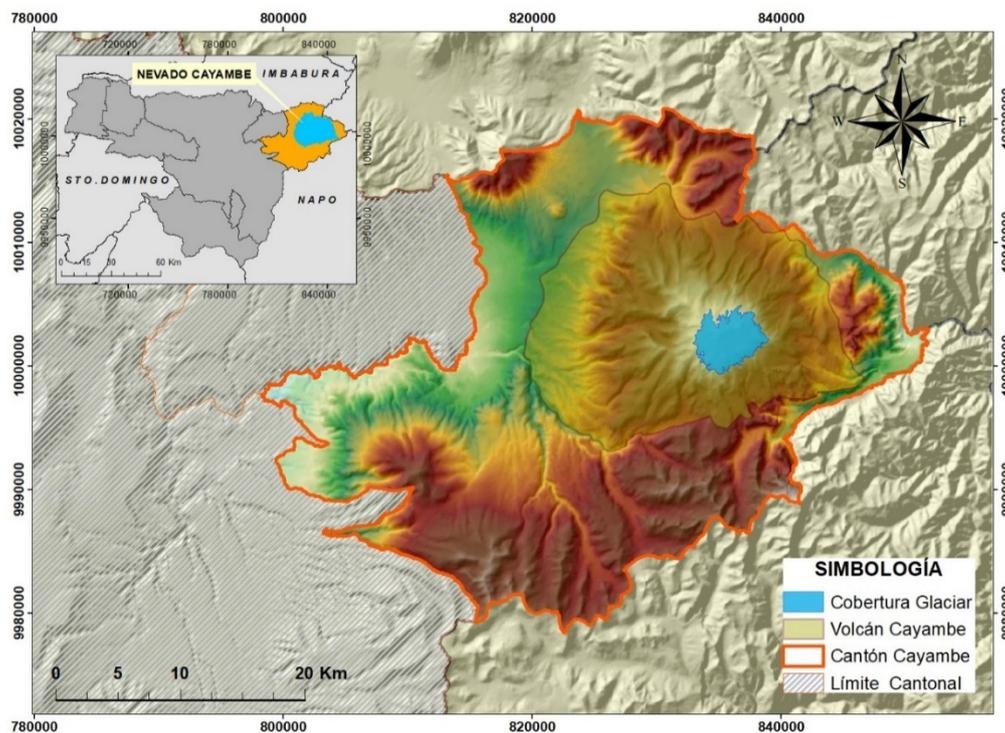
En la actualidad se afirma que hasta mitad del siglo solo podrán perdurar aquellos glaciares situados en cotas más elevadas, pero quizá esa probabilidad se reduzca con el pasar del tiempo (Rabatel et al., 2018). En los últimos años se ha observado que en el Ecuador la cobertura glaciar de varios nevados ha ido disminuyendo de manera continua, razón por la cual, numerosas cimas muestran varias geoformas propias de ambientes fríos como: roquedos, canchales, morrenas, entre otros (Francou et al., 2011), por lo que si estos glaciares desaparecen habría consecuencias en la disponibilidad de agua para las poblaciones y ecosistemas naturales (Cuadros, 2018).

En el nevado Cayambe la información sobre retroceso glaciar no ha sido profundizada, actualizada, ni relacionada con las variables climáticas, ya que la falta de datos acerca de los cambios ocurridos en relación a su desglaciación en los últimos años no permite obtener una visión clara de los problemas socioambientales que podrían producirse en las generaciones futuras (Rabatel et al., 2013), motivo por el cual es necesario aplicar diferentes metodologías de teledetección con el uso de imágenes satelitales (Fourqurean et al., 2014).

El presente estudio busca generar información cuantitativa a fin de detectar y localizar el cambio sufrido en la cobertura glaciar del nevado Cayambe en las últimas tres décadas y su relación con las tendencias de variabilidad climática, valores que pueden variar con el pasar de los años, determinados por medio de la aplicación de la proyección futura, información necesaria para generar conocimiento sobre los problemas que tienen los glaciares tropicales andinos y las afectaciones a las poblaciones aledañas. Dicha información generará un aporte a futuros investigadores, y a entidades gubernamentales para que se considere a ecosistemas vulnerables, como los glaciares, en la toma de acciones, siendo estas fuentes de agua para el consumo humano y ecosistemas prioritarios para la conservación. Según el Plan Creando Oportunidades del Ecuador, por medio del ordenamiento territorial se busca proteger las fuentes de agua y áreas de importancia, estableciendo como meta para el 2025, tener al menos el 16.45 % de territorio bajo conservación y manejo. También se considera promover buenas prácticas para la adaptación al cambio climático y la reducción de la contaminación por emisión de gases de efecto invernadero (Secretaría Nacional de Planificación, 2021)

## Materiales y métodos

Área de estudio. El glaciar del volcán Cayambe se ubica en la cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos (Figura 1) en la provincia de Pichincha, a 60 km al noroeste de la ciudad de Quito y a 15 km de la ciudad de Cayambe (0°1'30"N, 77°59'13,2"O). Su altitud es de 5 790 msnm en su cumbre máxima, siendo la tercera montaña más alta del Ecuador, es un volcán potencialmente activo y el único glaciar del mundo que cruza por la línea equinoccial. Está cubierto por un casquete glaciar que ocupa una extensión de 15 km<sup>2</sup> cuyo espesor se estima entre 30 y 50 m en la cumbre máxima, presenta una base rectangular de aproximadamente 24 km de este a oeste, por 18 km de norte a sur (Samaniego et al., 2004).



**Figura 1.** Ubicación del volcán Cayambe

En el Parque Nacional Cayambe Coca existen dos zonas climáticas: la zona de clima tropical mega térmico muy húmedo que se encuentra debajo de los 3000 msnm, y la zona de clima ecuatorial de alta montaña, ubicada sobre los 3100 msnm (Jácome et. al, 2020). El nevado Cayambe se sitúa en la zona de alta montaña y presenta características climáticas de temperatura que oscila entre los 0° a los 20°C, secuenciales precipitaciones y la humedad relativa es mayor al 80 % (Montero, 2010). Estas condiciones se deben al efecto de barrera producido por las masas cargadas de humedad provenientes de la vertiente Amazónica que chocan con la cordillera, originando precipitaciones en el flanco este del nevado mientras que en el flanco oeste la humedad es menor por la vertiente Pacífica que es más seca (Cáceres, 2010).

En la parte occidental del volcán se encuentran valles como el que está drenado por el río Blanco, que desciende de las cumbres noroccidente del nevado y atraviesa la ciudad Cayambe, desembocando en el río San José que a partir de ese punto se llama Granobles. La parte suroccidental del volcán está delimitada por el río Guachalá, que recibe los aportes del río Monjas (Samaniego et al., 2004). Alrededor del nevado Cayambe se encuentran montañas de rocas cubiertas de nieve, arenales, morrenas ya sean laterales, terminales, suelo o coberturas de vegetación, en la parte suroccidental del nevado cerca del glaciar hay formaciones de lagunas. El glaciar muestra grietas y

son de difícil acceso, en las partes bajas existen pendientes que son formaciones de hielo inclinadas de forma cónica, el glaciar tiene una coloración blanca y las partes con glaciar más pronunciadas son de color celeste; existe una alta reflectividad al interactuar con los rayos solares esto ocurre cuando está cubierto de nieve (Brito, 2014).

**Métodos. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales.** El presente proyecto tuvo como período de estudio 30 años, los cuales se dividieron en tres subperíodos de 10 años, obteniéndose dos imágenes satelitales por cada subperíodo (Tabla 1), las cuales fueron adquiridas del sitio web Earth Explorer de los sensores MSS, TM y ETM+. El nevado Cayambe por sus características geográficas y su ubicación en el valle interandino de la cordillera norte del Ecuador, se encuentra afectado por las diferentes temperaturas, lo cual generan un clima variado que desemboca en precipitaciones y un gran porcentaje de nubes (Ortega, 2012). Dicha nubosidad se observó en las imágenes Landsat que se descargó, en donde la mayoría cubrían los márgenes glaciares, lo cual impedía su geoprocesamiento. Ante aquello se analizó y se seleccionó aquellas imágenes libres de nubosidad (Brito, 2014).

**Tabla 1.**

Imágenes satelitales Landsat descargadas

Escena Landsat	Nivel de procesamiento geométrico	Fecha de adquisición	Grado de nubosidad	Datum/Zona UTM /Orientación
<b>LT50100601991288XXX02</b>	L1T	15/10/1991	40	WGS84 17 N
<b>LE70100601999318EDC00</b>	L1T	14/11/1999	40	WGS84 17 N
<b>LE70100602002102EDC00</b>	L1T	12/04/2002	22,23	WGS84 17 N
<b>LE70100602009249ASN00</b>	L1T	06/09/2009	34	WGS84 17 N
<b>LE70100602016237EDC00</b>	L1T	24/08/2016	28	WGS84 17 N
<b>LC80100602017263LGN00</b>	L1T	20/09/2017	34.27	WGS84 17 N

Se debe destacar que ciertas imágenes presentaron acumulación de nieve, debido a que fueron adquiridas de meses lluviosos, sin embargo, se determinó que dichas imágenes no interfieren en el proceso de digitalización glaciar a pesar de que presentaron cobertura de nieve.

Dentro de las imágenes Landsat que se utilizaron para la digitalización de la superficie glaciar del nevado Cayambe se pudo observar que dos de ellas (2009 y 2016) presentaban un problema de bandedo por la falla en el instrumento corrector de líneas escaneadas Scan Line Corrector (SLC-off) del sensor Landsat 7. Ante esto se utilizó la herramienta Gap Fill del software ENVI, con la finalidad de corregir el bandedo mediante la extrapolación de la información a alrededor de las mismas.

El preprocesamiento de las imágenes Landsat consistió en una corrección geométrica, una corrección radiométrica, el cálculo del índice de normalización diferencial de nieve, una clasificación supervisada y no supervisada, la vectorización y la delimitación manual con los programas ENVI y ArcGIS 10.8 (Brito, 2014; Gallegos-Castro et al. 2018). Para determinar la veracidad de la clasificación supervisada se realizó un análisis mediante el coeficiente Kappa y la matriz de contingencia con el fin de evaluar el grado de exactitud de la clasificación y el ajuste a la realidad en cuanto a diferenciación de cobertura de glaciar.

**Medición de áreas y cálculo del porcentaje del retroceso.** Se realizó el cálculo del área de los polígonos resultantes de la vectorización de la clasificación supervisada por medio del cálculo geométrico empleando el software ArcGIS 10.8 (Gallegos-Castro et al. 2018). Posteriormente, se calculó el coeficiente de correlación en función de los datos de área y los años del periodo de estudio, con la finalidad de verificar la existencia de una correlación directa o inversamente proporcional,

es decir si el área se reduce con el pasar de los años. Con dicho resultado se procedió a calcular el retroceso y el porcentaje por cada año de estudio (1991 – 2017).

**Análisis multitemporal de cambio de cobertura glaciar.** A partir de los datos de área calculados para cada subperíodo (1990, 2000, 2010 y 2020), que fueron obtenidos del método escogido por el coeficiente Kappa, se determinó la tasa de cambio anual que indicó la pérdida de la cobertura glaciar a través del tiempo (1990-2020), dicha tasa de cambio fue calculada a través la siguiente ecuación (I) (Bocco et al., 2001; Colonia y Torres, 2012).

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

**Donde:**

**N<sub>0</sub>** = Superficie de la cobertura glaciar en el tiempo inicial “0”

**N** = Superficie de cobertura en el tiempo final “1”

**r** = Tasa de cambio anual

**t** = Diferencia del tiempo en años

**Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar.** La serie de datos analizados en esta investigación fueron recolectados de dos estaciones meteorológicas M1094 Tomalón-Tabacundo y M0002 La Tola, pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). Dichas estaciones fueron consideradas debido a que presentaron menor porcentaje de déficit de datos y por su proximidad al volcán Cayambe. Los parámetros meteorológicos analizados fueron la temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) del período de estudio. Antes del análisis se realizó el control de calidad y relleno de datos mediante el método de la razón normal. Estas variables fueron estudiadas mediante estadística descriptiva y análisis de tendencias. Para el análisis estadístico se analizó la media, el máximo (Máx), mínimo (Min), la desviación estándar (DE) y coeficiente de variación (CV) (Limaico, 2019).

**Análisis estadístico de tendencias.** Para consolidar el método estadístico de tendencias fue necesario realizar el análisis de normalidad de los datos de temperatura y precipitación, mediante la prueba de Shapiro Wilks con un nivel de confianza del 95 %, con el fin de observar si los datos son paramétricos o no paramétricos, para lo cual se utilizó el software estadístico Infostat.

La prueba de Mann Kendall fue aplicada para los parámetros de precipitación media mensual y temperatura media mensual del período 1990-2020 mediante la ecuación (II) con nivel de confianza al 95 %. Dicha prueba estadística es idónea debido a que no es necesario la distribución normal de los datos y a su baja sensibilidad a series de tiempo poco homogéneas (Tabari et al., 2011).

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{[Var(S)]}} & si > 0 \\ 0 & si S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{[Var(S)]}} & si < 0 \end{cases} \text{ (II)}$$

A partir del estadístico Z se evaluó la hipótesis de interés, que puede ser:

- a)  $H_0$ : No existe tendencia vs  $H_1$ : Existe tendencia decreciente
- b)  $H_0$ : No existe tendencia vs  $H_1$ : Existe tendencia creciente

Cuando el resultado de Z es igual o mayor que 1.96, demuestra la existencia de tendencia significativa creciente. Si el resultado de Z es menor que 1.96, demuestra una tendencia no significativa creciente. Cuando el resultado de Z es igual o menor que -1.96, quiere decir que existe una tendencia significativa decreciente, y si el valor Z es mayor a -1.96 indica tendencia no significativa decreciente (Alencar da Silva y Nóbrega, 2017).

Complementando a la prueba de Mann Kendall se utilizó el estadístico de pendiente de Sen, propuesto por Pranab Sen en 1968, definiéndolo como la magnitud de la tendencia para datos climáticos de series de tiempo que es estimado a través de su pendiente (III) (Balakrishnan et al., 2008).

$$Sen = mediana \left( \frac{X_j - X_i}{j - i} \right) \quad j > i \quad (III)$$

**Donde:**

$X_j$  y  $X_i$  = corresponden a los datos climáticos

$j$  e  $i$  = periodo de años

**Relación de la variabilidad climática y el retroceso glaciar**

En función de la normalidad de los datos se realizó una correlación de Pearson y según los niveles de significancia se determinó si la correlación es directa o inversamente proporcional entre las variables (Tabla 2) (Hernández et al., 2018). También se realizó la regresión cuadrática el cual mostró en porcentaje la variabilidad de los valores para así obtener la relación entre las tendencias de variabilidad climática obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y el retroceso glaciar, con la finalidad de confirmar si las tendencias climáticas son unas de las razones del retroceso glaciar del volcán Cayambe.

**Tabla 2.**

Rango de valores de correlación R

Correlación	Valores
<b>Correlación inversa perfecta</b>	$r = -1$
<b>Correlación inversa</b>	$-1 < r < 0$
<b>No hay correlación</b>	$r = 0$
<b>Correlación directa</b>	$0 < r < 1$
<b>Correlación directa perfecta</b>	$r = 1$

Fuente: (Hernández, 2018).

Proyección futura del retroceso glaciar. Mediante los datos obtenidos del retroceso glaciar en el período de estudio, se estimó la superficie glaciar que se perderá para un período de 30 años a futuro, desde la actualidad que es el 2020 hasta el 2050, dicha estimación se lo realizó mediante el modelo matemático (IV) (Alva y Meléndez, 2009):

$$Px = P_0 + \frac{(P_1 - P_0)}{N} \cdot T \quad (IV)$$

**Donde:**

$P_x$  = Superficie glaciar en  $km^2$  que se quiere conocer en el año "x"

$P_0$  = Superficie glaciar en  $km^2$  para el primer año.

$P_1$  = Superficie glaciar en  $km^2$  para el último año.

$N$  = Número de años entre  $P_0$  y  $P_1$ .

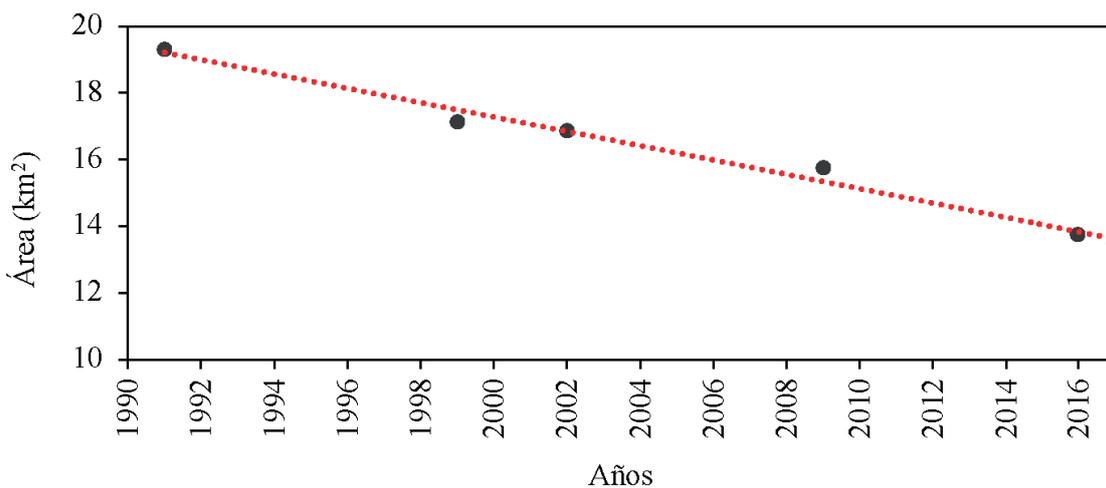
$T$  = Número de años entre el primer año y el año que se quiere conocer, es decir, entre  $P_0$  y  $P_x$ .

**Tendencias del retroceso glaciar del nevado Cayambe.** Con los datos de área calculados en el resultado del objetivo uno mediante la clasificación supervisada se determinó un modelo de regresión cuadrática para observar la relación del área y el tiempo con la finalidad de establecer las tendencias del retroceso glaciar para los años venideros. Por medio del método de mínimos cuadrados se evaluó la regresión cuadrática y se estableció los polinomios característicos mediante la ecuación (V) (Páez y García, 2016).

$$g(x) = ax^2 + bx + c \text{ (V)}$$

## Resultados y discusión

**Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales.** Los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes y el análisis del coeficiente Kappa mostraron valores de 0.84 a 0.96 para la clasificación supervisada, considerando el método más adecuado para la digitalización en pantalla de la cobertura nival debido a la alta semejanza entre la clasificación en software y la validación en campo. En cuanto el resultado del coeficiente de correlación mostró un valor de  $r = -0.993$ , al ser negativo muestra una correlación inversamente proporcional y al ser un valor próximo a 1, es una correlación casi perfecta por lo que se demuestra que el retroceso glaciar se presenta con el pasar de los años (Figura 2).



**Figura 2.** Áreas de cobertura glaciar en función de los años.

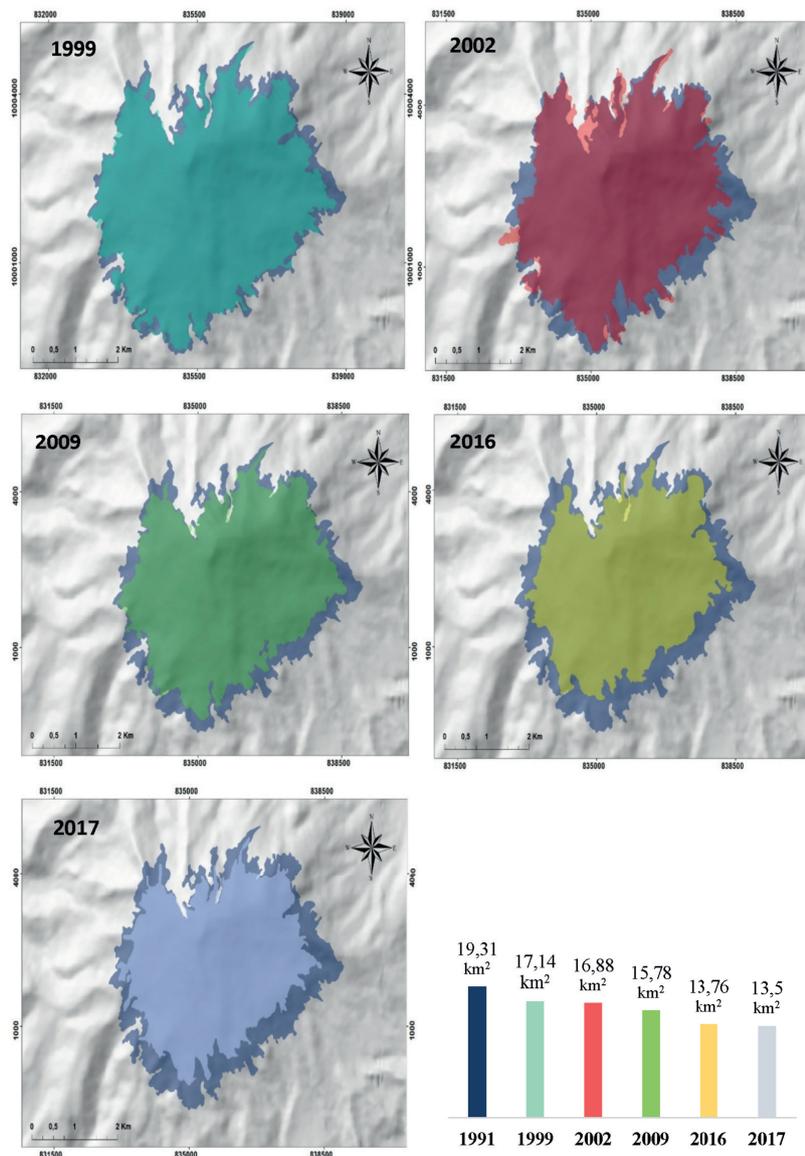
En el año 1991 el nevado Cayambe obtuvo un área glaciar de  $19.31 km^2$  y para el año 2017 una cobertura de  $13.50 km^2$ , lo que demuestra un retroceso glaciar de  $30.09 \%$  para el período de 1991-2017 (Tabla 3).

**Tabla 3.**

Superficie y porcentaje del retroceso glaciar obtenidas en la clasificación supervisada (1991-2017)

Año	Área (km <sup>2</sup> )	Área perdida en relación con 1991	Porcentaje de retroceso (%)
1991	19.31	-	-
1999	17.14	2.17	11.24
2002	16.88	2.43	12.58
2009	15.78	3.53	18.28
2016	13.76	5.55	28.74
2017	13.50	5.81	30.09

La reducción de la cobertura glaciar se evidenció mediante la cartografía (Figura 3) y tomando como referencia la cobertura del año 1991, donde se demuestra el retroceso progresivo en las zonas noreste y sureste del nevado para los años 1999 y 2002 a partir del 2009 se demuestra retroceso en todas las zonas del glaciar hasta el año 2017.



**Figura 3.** Retroceso del nevado Cayambe en los diferentes años en función del año 1991

Gallegos-Castro et al. (2018) reportaron un retroceso glaciar del nevado Cayambe de 25.58 % para el período 1979 y 2009, mientras que Salinas (2020), por su parte, analiza el mismo nevado, pero en diferentes periodos (1991 y 2017) y obtiene como resultado el 25.17 % de retroceso de cobertura nival, resultados que son similares a los obtenidos en la presente investigación. El nevado Cayambe es importante porque aporta a varios de los recursos hídricos de los alrededores que benefician a las poblaciones cercanas, por lo que la reducción existente afectaría a este aporte hídrico que es directo del glaciar, probablemente aumentando su flujo por el constante derretimiento hasta desaparecer completamente (Brito, 2014).

Estudios realizados en otros glaciares del Ecuador también presentaron reducciones de cobertura glaciar, como el Iliniza Sur, que tuvo una pérdida del 41 % del glaciar en el período 1956-2000 (Febres, 2007), consecuente para años posteriores 1991-2019 dicho glaciar tuvo una pérdida del 15.29 % (Salinas, 2020). Este glaciar, junto con el Carihuyrazo y Altar se consideran glaciares pequeños ubicados a menor altitud, esto provoca que estén sujetos a balances negativos constantes por lo cual se encuentran en desequilibrio y en riesgo de extinción en las próximas décadas (Cáceres, 2010).

Collet (2010) determina que el volcán Cotopaxi en el año 1979 tuvo una superficie de 18.33 km<sup>2</sup>, la cual se redujo a 11.53 km<sup>2</sup> en 2007. Durante los mismos años el nevado Antisana presentó una reducción del glaciar con una superficie inicial de 21.36 km<sup>2</sup> y una superficie final de 12.76 km<sup>2</sup> por lo que ambos glaciares tuvieron un retroceso del 40 % para el periodo estudiado. Así mismo, Cáceres (2010) confirma el retroceso glaciar de los dos nevados antes mencionados en el período de estudio 1997-2006 con el 22.50 % de pérdida y con respecto al Chimborazo tuvo una pérdida de glaciar 20.2 %.

**Tasa anual de pérdida de cobertura.** Las tasas de cambio obtenidas al ser negativas muestran disminución durante los diferentes períodos. La tasa de cambio para el período (1991-1999) tuvo un decrecimiento de -1.47 % por año, para el período (2002-2009) un decrecimiento de -0.96 % por año y para el período (2009-2017) un decrecimiento de -1.93 % por año siendo este último aquel que tuvo un mayor retroceso (Tabla 4). En cuanto a la tasa de cambio para el período de 30 años (1990-2020) se obtuvo un valor de -1.19 % definiéndolo como el valor porcentual de pérdida de cobertura glaciar en el período de estudio.

**Tabla 4.**

Tasa de cambio anual del nevado Cayambe obtenidas de la clasificación supervisada

Año	Área (km <sup>2</sup> )	Área perdida en relación con 1991	Porcentaje de retroceso (%)
1991	19.31	-	-
1999	17.14	2.17	11.24
2002	16.88	2.43	12.58
2009	15.78	3.53	18.28
2016	13.76	5.55	28.74
2017	13.50	5.81	30.09

La tasa de cambio anual representa un valor importante dentro de los estudios de retroceso glaciar debido a que indica el valor de retroceso por año y la tendencia a retroceder en los años subsiguientes, es así que Colonia y Torres (2012) expresan en su investigación tasas de cambio anual de -1.15 % y -1.17 % para los glaciares Pisco y Yanapaccha, respectivamente en Perú, siendo valores similares al presente estudio el cual se obtuvo un valor de -1.19 % confirmando la innegable retracción del nevado Cayambe.

**Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar. Análisis climático.** Las estaciones meteorológicas M1094 Tomalón Tabacundo y M0002 La Tola, no presentaron variabilidad de los datos de temperatura media anual según las pruebas estadísticas de desviación estándar y coeficiente de variación. Los datos de precipitación media anual presentaron una alta variabilidad y baja homogeneidad debido a datos no próximos a la media en las dos estaciones.

Para el periodo de 30 años (1990-2020), en las estaciones Tomalón Tabacundo y La Tola, se registró un promedio histórico que fluctúa entre 15°C y 16°C para la temperatura, y entre 51.11 mm a 71 mm para la precipitación en ambas estaciones. Desde 1990 mostró variaciones de altas y bajas temperaturas, sin embargo, desde 2012 tuvo constante ascenso. Lo contrario se evidenció para la precipitación, la cual mostró valores por debajo de la media desde el 2014 hasta el 2019; lo que demuestra que el aumento de la temperatura es inversamente proporcional a la precipitación. Las dos estaciones meteorológicas presentaron una época ecológicamente lluviosa de tipo bimodal, misma que corresponde a los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre para la estación Tomalón Tabacundo; mientras que para la estación La Tola corresponde a los meses de enero a mayo y de octubre a diciembre.

Según Villacis et al. (2012), el análisis de las variaciones de temperatura y precipitación según investigaciones regionales, muestran un incremento general de temperatura en toda América Latina y en los Andes un incremento de una décima de grado por década. En Ecuador se evidenció un acrecentamiento de la temperatura anual de 0.12°C/década en los últimos 100 años (Serrano et al., 2012), esto debido a que en el 2015 el fenómeno del niño experimentó una serie de fluctuaciones como es el aumento de las ondas Kelvin las cuales contribuyeron a que la temperatura bajo la superficie de la mayor parte del Pacífico ecuatorial oriental exhibiera grandes regiones más cálidas de lo habitual y con escasez de precipitaciones (Altamirano, 2019).

**Tendencias de variabilidad climática.** Los resultados de la prueba de normalidad de los datos de temperatura de las estaciones Tomalón Tabacundo y La Tola realizado mediante el estadístico Shapiro Wilks obtuvieron un p-value = 0.55 y p-value = 0.25, respectivamente, demostrando que los datos son paramétricos; sin embargo, para realizar el análisis estadístico de Mann Kendall no es necesario la distribución normal de los datos pese a ser un estadístico no paramétrico, como lo mencionan (Tabari et al., 2011), por lo que la estación Tomalón Tabacundo presentó tendencia significativa creciente en los meses septiembre y noviembre con valores de  $Z= 2.05$  y  $Z=2.33$  respectivamente, los meses restantes presentaron tendencia creciente pero no significativa e indicaron la posibilidad de que la temperatura media mensual continúe en aumento, mientras que la estación La Tola denotó valores positivos, pero estadísticamente no significativos para los meses febrero, marzo, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre, los meses restantes fueron valores negativos. En cuanto a la precipitación, los datos para las dos estaciones no presentaron normalidad (p-value = 0.0001), y el estadístico Mann Kendall no obtuvo significancia estadística, demostrando que la precipitación es errática y no presenta tendencias significativas, a pesar de que las dos estaciones obtuvieron valores con tendencias decrecientes en la mayoría de los meses.

Los resultados obtenidos son semejantes a los reportados por otras investigaciones realizadas a nivel regional. Inzunza et al. (2011) determinaron que en México la "Comarca Lagunera" obtuvo una tendencia creciente en temperatura no significativas en todos los meses desde el año 2009, por lo que determinaron que la temperatura continúa en aumento. Los valores erráticos de las tendencias de la precipitación se deben a que las diferencias en la precipitación a escala de kilómetros son grandes, y estas se incrementan en zonas montañosas debido a la interacción de la orografía con la atmósfera, desembocando en que áreas montañosas como la cordillera de los Andes, la precipitación y sus patrones sean más fluctuantes en espacio y tiempo (Tapiador et al., 2011). Dicho comportamiento diverso de precipitación se evidencia dentro del Distrito

Metropolitano de Quito, donde existen cambios inclusive en su estacionalidad debido a que el cambio climático y la variación climática pueden estar influenciados por factores antropogénicos o las condiciones atmosféricas, que pueden alterar el clima de una localidad, en los valles interandinos donde se encuentra el nevado Cayambe, el clima está afectado por masas de aire que provienen del océano pacífico y de la Amazonía, también a causa de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y entre otras causas o fenómenos que podrían tener relación con estas fluctuaciones de tendencias positivas y negativas de temperatura (Serrano et al., 2012).

**Relación entre tendencias de variabilidad climática y retroceso glaciar.** La temperatura media anual como variable climática mostró una tendencia no significativa de incremento en el nevado Cayambe con un valor positivo  $Z = 0.55$ . Sin embargo, la temperatura media anual con la superficie glaciar mostró una correlación leve con un valor de  $r = -0.27$ . Con respecto a la tendencia de la precipitación acumulada anual esta disminuye en la zona de estudio con un valor no significativo  $Z = -0.43$ . Dicha variable con la superficie glaciar mostró un grado de asociación similar a la temperatura media anual ( $r = 0.22$ ), definida como correlación baja-leve. Los valores, aunque fueron bajos afirman que existe baja correlación entre la superficie glaciar y las variables climáticas por el nivel de significancia que es de 0.00001.

La correlación de Pearson permitió confirmar que existe un nivel de asociación entre el retroceso la superficie glaciar y la variabilidad de la temperatura y precipitación. Es decir, la superficie glaciar es inversamente proporcional con el incremento de la temperatura (tendencia) a razón de  $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la disminución de la precipitación (tendencia) es directamente proporcional con el retroceso glaciar a razón de  $-0.43\text{ mm}$  (Tabla 5) para los 30 años de estudio.

**Tabla 5.**

Tendencias de temperatura y precipitación de la estación Tomalón Tabacundo

Años	Tendencia Z temperatura	Tendencia Z precipitación
1990	-0.90	-0.21
1991	-1.12	-0.48
1992	-1.50	-1.03
1993	2.20	-0.89
1994	0.97	-0.07
1995	-1.17	0.89
1996	2.96	-1.44
1997	2.43	-0.62
1998	-3.06	-0.34
1999	0.28	-1.03
2000	2.95	-1.58
2001	2.43	-1.03
2002	-0.28	0.89
2003	-0.89	-0.07
2004	0.69	0.62
2005	0.89	-0.34
2006	0.41	0.07
2007	-1.17	0.00
2008	1.76	-0.75
2009	3.16	-1.03
2010	-2.67	1.58
2011	1.11	-0.48
2012	1.87	-0.34
2013	-0.28	-0.34
2014	1.25	0.00
2015	2.54	-1.71
2016	-1.59	-0.48
2017	1.81	-0.89
2018	2.41	-1.30
2019	-1.03	-0.62

La variabilidad de la temperatura media anual con relación al retroceso glaciar es de 7.4 % en el periodo de 30 años. La precipitación acumulada anual tiene una variabilidad del 4.7 % con relación a la superficie glaciar. Los valores de los coeficientes de determinación indicaron que la variabilidad climática afecta al retroceso glaciar, pero en menor magnitud, por lo que otras variables ambientales y antropogénicas también podrían ser las causantes de la dinámica de la superficie glaciar (Vásconez et al., 2017).

Aspectos similares se encontraron en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita de Colombia, donde se identificó alta vulnerabilidad ante las variaciones climáticas donde se detectó aumentos para el período 1981-2010 de 0.1 a 0.4 °C/década para la temperatura media, y de 0 a 250 mm/década en las precipitaciones medias anuales; por ende, la tendencia en aumento de temperatura es evidente, aunque a nivel estadístico se registra tendencia positiva que es ampliamente influenciada por el fenómeno de La Niña en el período 2010-2011, el cual aumentó significativamente los volúmenes de lluvias a nivel intra – anual e interanual (Alzate et al., 2015).

Además, Colonia y Torres (2012) reportan correlaciones similares al presente estudio con valores de  $r = -0.02$  con respecto a la temperatura y el retroceso glaciar y  $r = 0.28$  con respecto a la precipitación y disminución del glaciar, demostrando una tendencia de aumento de temperatura de 0.0006°C y disminución de precipitaciones de -8.2628 mm para un período de 20 años. Se debe mencionar que las tendencias no solo se deben a causas de variabilidad climática, sino que se presentan a través de otros factores como la deforestación, urbanización y aumento de gases de efecto invernadero principales contribuyentes del calentamiento global (Hurtado y Mesa, 2015).

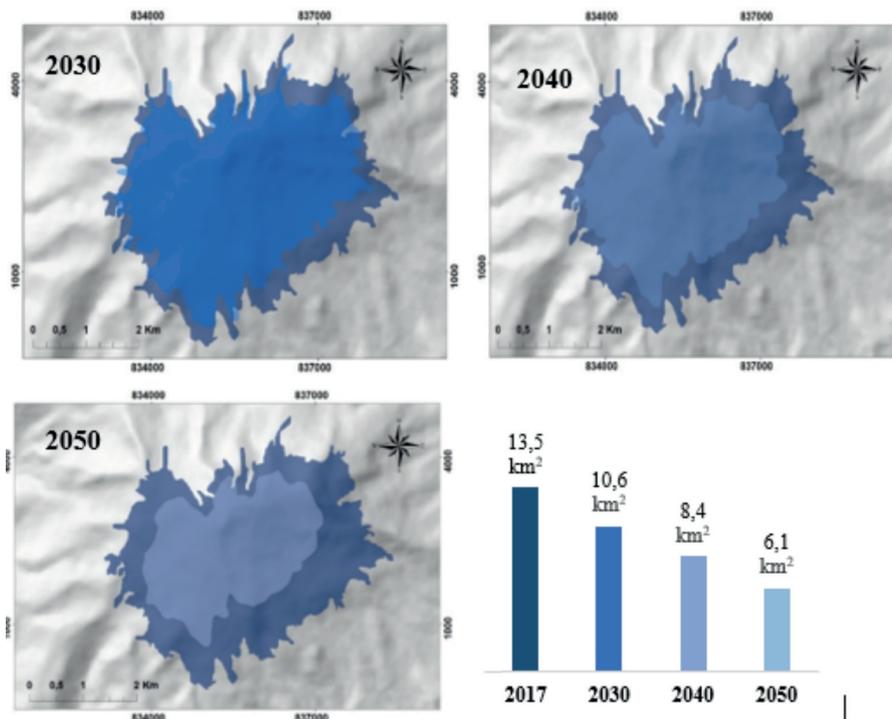
**Proyección futura del retroceso glaciar.** La superficie glaciar del nevado Cayambe seguirá en reducción para los años venideros sobre todo para el año 2050 que tendrá un área de 6.1 km<sup>2</sup> con una reducción del 68.4 % tomando como referencia el año inicial 1991 que tuvo un área de 19.31 km<sup>2</sup> (Tabla 6). Se debe tomar en cuenta que la proyección futura puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas y las características particulares de la zona de estudio hasta el 2050.

**Tabla 6.**

Escenario futuro de la superficie glaciar del nevado Cayambe

<b>Años de proyección</b>	<b>Área glaciar (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área perdida en relación con 1991</b>	<b>Porcentaje de retroceso (%)</b>
<b>2030</b>	10.6	8.7	45.1
<b>2040</b>	8.4	10.9	56.5
<b>2050</b>	6.1	13.2	68.4

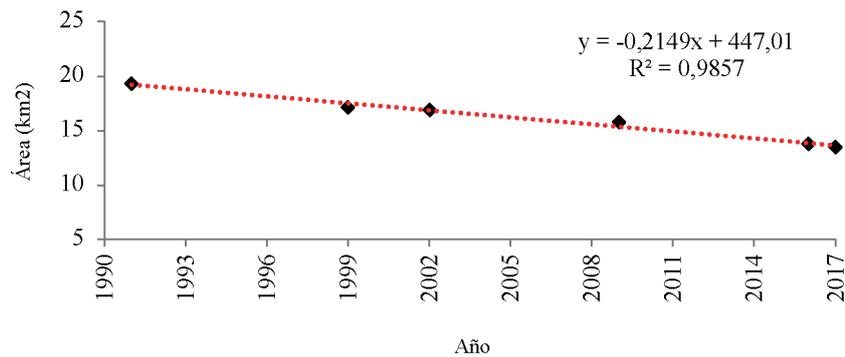
Se obtuvo como instrumento de soporte un mapa (Figura 4) mediante procesos de interpretación visual y digitalización en pantalla de coberturas de nieve, en donde se observó de manera gráfica como las zonas de cobertura glaciar varían con el pasar del tiempo. El mapa generado representa la superficie glaciar de los diferentes años (2030, 2040 y 2050) a través de diferentes colores.



**Figura 4.** Retroceso del nevado glaciar en los años 2030, 2040 y 2050

Estudios realizados en los Andes tropicales de Perú y Colombia hacen alusión a que sus glaciares tienden a perder cobertura nival con el pasar del tiempo, tal es el caso del estudio realizado por Bautista y Correa (2018), quienes analizaron tanto en períodos cortos como períodos largos que la cobertura glaciar del nevado Cocuy desaparecerá en el año 2045 en función del área estimada en el año 1987. Colonia y Torres (2012) presentan las proyecciones de retroceso glaciar de 19 nevados de la cuenca Llanganuco de Perú hasta el año 2037, teniendo como resultado una superficie glaciar de 18.27 km<sup>2</sup> con una reducción del 35 % con referencia al año 1987. De igual manera Schauwecker et al. (2017) estiman que la superficie glaciar de la Cordillera Blanca de Perú tendrá una reducción entre 38 a 60 % para finales del siglo XXI, y de 49 a 75 % de retroceso para el año 2080, esto debido a la interacción con las variables climáticas como la altura de congelación que es un gran indicador de aporte glaciar. Según el escenario RCP 2.6, se estimó que la altura de congelación aumentará en 230 m, donde el hielo se derretirá a partir de los 0°C. Bajo el escenario pesimista RCP 8.5, se determinó que el aumento será tres veces mayor, estimando un aumento de la altura de congelación de 850 m donde se preservarán las áreas glaciares que estarán por encima de esta, teniendo únicamente el 15 % del área glaciar desaparecerán durante las próximas décadas por encontrarse en desequilibrio climático (Chamba y Chunchu, 2017).

**Tendencia del retroceso glaciar del nevado Cayambe.** La regresión cuadrática expuso un valor  $R^2 = 0.9857$  (Figura 5) demostrando el grado de tendencia de retroceso glaciar en el período de estudio e indica que el error cuadrático medio generado por dicha función es cercano a cero y la curva representativa de esta función pasa cerca de los valores de las áreas medidas del glaciar en los diferentes años, en donde, al mostrar una pendiente negativa significa que presenta una relación indirectamente proporcional entre el área de la cobertura glaciar y el tiempo, siendo una tendencia decreciente y que con el pasar de los años la superficie glaciar tiende a retroceder estimando que para el 2080 el glaciar desaparecerá en su totalidad.



**Figura 5.** Resultado de la regresión cuadrática del área en función del tiempo

Brito (2014) confirma la tendencia de retroceso glaciar del nevado Cayambe a causa del cambio climático al obtener un  $R^2 = 0.9536$  y destaca que el retroceso es más notorio desde 1999 al 2009, pero al ser un análisis con pocos datos y con dificultades en el tratamiento de la imagen del año 2009, infiere que es necesario realizar dicho análisis con datos climáticos para confirmar el cambio climático; sin embargo, la información espectral que muestra los sensores de la plataforma LANDSAT, se puede identificar la variación de la cobertura de nieve en el período de estudio (1979-2009).

Páez y García (2016) mencionan en su investigación de tendencia de retroceso glaciar para los años próximos, que se obtuvo una tendencia alta tras realizar la regresión lineal simple y la regresión cuadrática obteniendo valores  $R^2 = 0.986$  y  $R^2 = 0.997$  respectivamente, lo que indica que tienen una tendencia decreciente del retroceso glaciar con el tiempo de la Sierra Nevada de Santa Marta de Colombia y con la implementación de los modelos de las regresiones se obtuvo la estimación donde puede desaparecer el glaciar, dando como resultado por el modelo lineal el glaciar desaparecerá para el año 2030 y con el modelo cuadrático el glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta desaparecerá para el año 2022.

## Conclusiones

Mediante la regresión lineal ( $R^2 = 0.9857$ ) se determinó que existe un retroceso glaciar con el pasar de los años. En el año 1991 se obtuvo un área de 19.31 km<sup>2</sup>, mientras que para el año 1999 esta se redujo a 17.14 km<sup>2</sup>, dicha tendencia de decrecimiento del glaciar se manifestó para los años subsiguientes 2002 con un área glaciar de 16.88 km<sup>2</sup> y 2009 un área de 15.78 km<sup>2</sup>. En el tercer y último período se determinó que la tendencia continúa debido a que el área glaciar para el año 2016 es de 13.76 km<sup>2</sup> y para el año 2017 es de 13.5 km<sup>2</sup>.

La tendencia de la temperatura en los 30 años de estudio es de  $Z = 0.55$  demostrando tendencia creciente no significativa y la precipitación presentó una tendencia decreciente no significativa de  $Z = -0.43$ , sin embargo, las variables climáticas influyen en el retroceso glaciar del nevado Cayambe. Estas influencias se confirmaron con la correlación estadística de Pearson para ambas variables climáticas en los 30 años de análisis. Es decir, la correlación de la temperatura media anual y el área glaciar alcanzó a ser de -0.27 (correlación leve), lo que significa que la superficie glaciar disminuye por el incremento de temperatura a razón de 0.008 °C. Por otra parte, la correlación de la precipitación acumulada anual y la superficie glaciar es de 0.22 (correlación baja-leve), indica que la disminución de precipitación influye en el retroceso glaciar a razón de -0.43 mm, para los 30 años.

La proyección futura demuestra que el retroceso glaciar del nevado Cayambe seguirá en constante variabilidad, por lo que para el año 2030 el área será de 10.6 km<sup>2</sup>, para el año 2040 tendrá un área glaciar de 8.4 km<sup>2</sup> y para el año 2050 el nevado Cayambe tendrá un área de 6.1 km<sup>2</sup>, resultados que se afirman con las tendencias de retroceso con las variables de área de cada año en función del tiempo donde muestra una tendencia de 0.9857 de retroceso glaciar y según el polinomio cuadrático para el año 2080 el glaciar desaparecerá en su totalidad.

## Recomendaciones

Realizar posteriores estudios donde se realicen mediciones del volumen del glaciar empleando diferentes técnicas, permitiéndose así obtener información acerca de la evolución del glaciar a través de los años, así como su función en el aporte de recursos hídricos para las comunidades aledañas.

Emplear imágenes satélites con una resolución mejorada, como Sentinel 2, que permita obtener una clasificación con mayor discriminación de las diferentes coberturas. A su vez que permita observar las morrenas alrededor del nevado Cayambe para posteriores estudios.

El análisis de variabilidad y tendencias climáticas se lo realizó con las variables de temperatura y precipitación que son dos de las variables más importantes en cuanto a la identificación del cambio climático, sin embargo, para futuras investigaciones se debe considerar distintas variables meteorológicas como la humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, entre otros, para determinar una tendencia de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar con más precisión.

Mejorar el modelo matemático de la predicción futura donde se relacione la temperatura que se puede recolectar de imágenes térmicas de la zona de estudio, el área ocupada por el glaciar y el tiempo para determinar con mayor fiabilidad el año en que podría desaparecer el glaciar.

## Referencias

- Alencar da Silva, K. y Nóbrega, R. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó – Pernamcuco – Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, vol. 1, núm. 58. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.58-1.12>
- Altamirano, C. (2019). Evaluación de la superficie de nieve del volcán Chimborazo – Ecuador entre los años 2000 y 2014. [Tesis de posgrado]. Universidad de Salzburg. [https://issuu.com/unigis\\_latina/docs/tesis\\_altamirano1](https://issuu.com/unigis_latina/docs/tesis_altamirano1)
- Alva, M. y Meléndez, J. (2009). Aplicación de la teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca, provincia de Huaraz, distritos Huaraz e Independencia, periodos: 1989 –1998 – 2005. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Investigaciones Sociales*. Vol. 13 N° 22, pp. 71 – 83. <https://doi.org/10.15381/is.v13i22.7216>
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J. y Ramón, J. (2015). Cambio y variabilidad climáticos para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander – Colombia. *Revista Luna Azul*, 39, 127-153. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-24742015000100010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742015000100010)
- Balakrishnan, N., Peña, E. y Silvapulle, M. (2008). Pranab Kumar Sen: Life and works. *IMS Collections. Institute of mathematical statistics*. Vol 1, 1-16. <https://doi.org/10.1214/193940307000000013>

- Bautista, W. y Herrera H. (2018). Dinámica de cambio para el glaciar nevado el Cocuy en Colombia. Propuesta metodológica que evalúa el comportamiento y evolución a partir de teledetección y modelación de variables climatológicas para los períodos (1987-1997-2009-2015). Tesis de grado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio Udistrital. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13771>
- Belmonte, A. (2017). Los glaciares: un recurso educativo dentro y fuera del aula. Enseñanza de las ciencias de la Tierra. Edición electrónica: 2385 – 3484. Pgs 88 – 94. ISBN: 112-9157. [https://www.researchgate.net/publication/329034391\\_Los\\_glaciares\\_un\\_recurso\\_educativo\\_dentro\\_y\\_fuera\\_del\\_aula](https://www.researchgate.net/publication/329034391_Los_glaciares_un_recurso_educativo_dentro_y_fuera_del_aula)
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. Num. 44. Pp. 18 – 38. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112001000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000100003&lng=es&tlng=es)
- Bolch, T. (2006). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change* 56, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- Brito, C. (2014). Análisis espacial y temporal de la variación de cobertura nivo-glaciar en el nevado Cayambe mediante imágenes satelitales LANDSAT y sistemas de información geográfica (SIG). [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8837?mode=full>
- Cáceres, B. (2010). Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador. [Tesis de Maestría. University Nice Sophia Antipolis, Francia], pp 84. <https://core.ac.uk/download/pdf/39836084.pdf>
- Chamba, E. y Chunchu, J. (2017). Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y temperatura, ligada al cambio climático, en la provincia de Loja. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio UNL.
- Collet, M. (2010). Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires De l'Antisana et du Cotopaxi Ecuador: Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique. [Tesis de postgrado, Universidad de Reber 2-Haute]. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers11-07/010051674.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-07/010051674.pdf)
- Colonia, D. y Torres, J. (2012). Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987- 2007. *GEOBIA*, p. 592. <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.14.18.05/doc/165.pdf>
- Cuadros, S. (2018). Estimación de la pérdida del área glaciar en la cuenca de la laguna Parón – Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca). [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3835>
- Febres, I. (2007). Análisis tempo-espacial de la cobertura nivo-glaciar del nevado Iliniza Sur. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica del Ecuador]. Repositorio EPN: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/549>
- Fourqurean, J., Beverly, J., J. Boone, K., Kennedy, H., Lovelock, C., Megonigal, P., Rahman, A., Saintilán, N. y Simard, M. (2014). Carbono Azul: Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos. Conservación Internacional (CI); Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI); Unión Internacional

- para la Conservación de la Naturaleza (UICN). [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372868\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372868_spa)
- Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B. y Mendoza, J. (2000). Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antisana, Ecuador. *Ambio*, 29(7): 416-422. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.416>
- Francou, B., Cáceres, B., Villacís, M., Basantes, R., Maisincho, L., Galárraga, R. y Romero, J.C. (2011). Analizando el cambio climático a partir de los glaciares del Ecuador. IRD, SENESCYT, EPMAPS, INAMHI, EPN.
- Francou, B., Cáceres, B., Gomez, J., y Soruco, A. (2007). Coherence of the glacier signal throughout the tropical Andes over the last decades. *Proceedings of the First International Conference on the Impact of Climate Change on High-Mountain System*, IDEAM, pp. 87–97. [https://www.researchgate.net/publication/316827366\\_Coherence\\_of\\_the\\_glacier\\_signal\\_throughout\\_the\\_tropical\\_Andes\\_over\\_the\\_IHernast\\_decades](https://www.researchgate.net/publication/316827366_Coherence_of_the_glacier_signal_throughout_the_tropical_Andes_over_the_IHernast_decades)
- Gallegos-Castro, E., Brito-Chasiluisa, C. Serrano-Giné, D., y Galárraga-Sánchez, R.. (2018). Análisis de la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar del nevado Cayambe, Ecuador, mediante fotografías aéreas e imágenes Landsat. *GeoFocus (Artículos)*, nº 22, p. 97-113. ISSN: 1578-5157. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.577>
- Hernández, J., Espinoza, J., Peñaloza, M., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S. y Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de farmacología y terapéutica*. Volumen 37, número 5. [https://www.revistaavft.com/images/revistas/2018/avft\\_5\\_2018/25sobre\\_uso\\_adecuado\\_coeficiente.pdf](https://www.revistaavft.com/images/revistas/2018/avft_5_2018/25sobre_uso_adecuado_coeficiente.pdf)
- Hurtado, A. y Mesa, O. (2015). Cambio climático y variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Revista impresa – ISSN WEB 2463-0950. Año XII. Volumen 12, número 24. Pp. 131-150.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Climate Change. (2007). Summary for policymakers. IPCC Working Group I Fourth Assessment Report. IPCC. 1-18. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)
- Inzunza, J., Bernardo, L., Valdez, R., Mendoza, B., Sánchez, I. y García, G. (2011). La variación de las temperaturas extremas en la “Comarca Lagunera” y cercanías. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 17, 41–61. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-40182011000500006&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182011000500006&nrm=iso)
- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí, I. y Pupiales, N. (2020). Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico. Imbabura-Ecuador. FICAYA Emprende.
- Limaico, K. (2019). Determinación de las fechas de siembra de tres cultivos al temporal, con base en el Kc del cultivo y el agua disponible en Tumbaco. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18511>
- Montero, I. (2010). En el vértice del Ecuador: el descubrimiento del sitio a más altitud en el globo terráqueo por donde cruza la línea ecuatorial. Editorial Montero. Am&Am. ISBN: 9786070034473
- Ortega, A. (2012). Análisis de riesgos naturales en la subcuenca del río Blanco, desde su origen hasta la ciudad de Cayambe, provincia de Pichincha. [Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio USFQ. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1990>

- Páez, B. y García, C. (2016). Análisis multitemporal del retroceso glaciar en la Sierra Nevada Santa Marta – Colombia para los períodos 1986, 1996, 2007 y 2014. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio RIUD: <http://hdl.handle.net/11349/3508>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J.L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J-E., Higgel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galárraga, R., Ginot, P., Maicincho, L., Mendoza, J., Ménégos, M., Ramírez, E., Ribstein, P., Suárez, W., Villacís, M., y Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, pp. 81-102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, A., Ceballos, J., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., Mölg, N., Ménégos, M., Huggel, C. y Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers?. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100 (1), pp. 75-95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>
- Salinas, T. (2020). Análisis de la variación de la cobertura glaciar en el Ecuador mediante teledetección. [Tesis de pregrado]. Repositorio UG: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49982>
- Samaniego P., Eissen J., Monzier M., Robin C., Alvarado A. y Yepes H. (2004). Series los peligros volcánicos en el Ecuador: Los peligros volcánicos asociados al Cayambe. Corporación Editora Nacional. <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/38-los-peligros-volcanicos-asociados-con-el-cayambe>
- Schauwecker, S., Kronenber, M. y Cruz, R. (2017). El futuro del clima y de los glaciares en el Perú. CARE Perú. 1ra edición. <https://www.proyectoglaciares.pe/wp-content/uploads/2018/05/Informe-Futuro-del-Clima-y-de-los-Glaciares-en-el-Peru.pdf>
- Schoolmeester, T., Johansen, K.S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M. y Verbist, K., (2018). Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arendal. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
- Secretaría Nacional de Planificación, (2021). Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025. Gobierno de la República del Ecuador. [https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creaci%C3%B3n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado\\_compressed.pdf](https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creaci%C3%B3n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado_compressed.pdf)
- Serrano, S., Zuleta-Mediavilla, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., y Villacis, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja* (Vol. 16). <https://doi.org/10.17163/lgr.n16.2012.03>
- Silverio, W. y Jaquet, J. (2003). Aplicación de la Teledetección satelitaria para la estimación del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca Perú, entre 1987 y 1996. Universidad de Ginebra. [https://www.researchgate.net/publication/290446466\\_Aplicacion\\_de\\_la\\_teledeteccion\\_satellitaria\\_para\\_la\\_estimacion\\_del\\_retroceso\\_glaciar\\_en\\_la\\_Cordillera\\_Blanca\\_Peru\\_entre\\_1987\\_y\\_1996](https://www.researchgate.net/publication/290446466_Aplicacion_de_la_teledeteccion_satellitaria_para_la_estimacion_del_retroceso_glaciar_en_la_Cordillera_Blanca_Peru_entre_1987_y_1996)
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., y Gonzalez, J.F. (2009). Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, 36, L03502. <https://doi.org/10.1029/2008GL036238>
- Tabari H., Marofi S., Aeni A., Talaee P.H. y Mohammadi K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151 (2), 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009>

- Tapiador, F., Hou, A., de Castro, M., Checa, R., Cuartero, F. y Barros, A. (2011). Precipitation estimates for hydroelectricity. *Energy & Environmental Science*, 4(11), 4435-4448. <https://doi.org/10.1039/C1EE01745D>
- Vásconez, F., Andrade, D., Bernard., B., Hidalgo, S. (2017). Delimitación de zonas amenazadas por lahares en el drenaje Occidental del Nevado Cayambe. VII Jornadas en Ciencias de la Tierra. Instituto Geofísico y Escuela Politécnica Nacional. [https://www.researchgate.net/publication/316847085\\_Delimitacion\\_de\\_zonas\\_amenazadas\\_por\\_lahares\\_en\\_el\\_drenaje\\_Occidental\\_del\\_Nevado\\_Cayambe](https://www.researchgate.net/publication/316847085_Delimitacion_de_zonas_amenazadas_por_lahares_en_el_drenaje_Occidental_del_Nevado_Cayambe)
- Villacís, M., A. Fernández, J. C. Pouget y M. Escobar. (2012). Impactos del cambio climático en el sector agua durante los últimos 30 años e identificación de los aspectos que constituyen la vulnerabilidad. *Estudio de Vulnerabilidad del DMQ. La Granja*. Vol.16(2): 23-47. ISSN: 1390-3799.