



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

ANÁLISIS DEL RETROCESO GLACIAR EN LOS ANDES DEL NORTE DEL
ECUADOR DURANTE UN PERÍODO DE 30 AÑOS EMPLEANDO
TELEDETECCIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO/A EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORES: Estefanía Belén Cabrera Montenegro
Joe Carlos Vega Tamba

DIRECTOR:
Ing. Gabriel Alexis Jácome Aguirre MSc.

Ibarra-Ecuador
2022

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 31 de enero del 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DEL RETROCESO GLACIAR EN LOS ANDES DEL NORTE DEL ECUADOR DURANTE UN PERÍODO DE 30 AÑOS EMPLEANDO TELEDETECCIÓN”, de autoría de la señorita Cabrera Montenegro Estefanía Belén y el señor Vega Tamba Joe Carlos estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

MSc. Gabriel Jácome
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN



MSc. Oscar Rosales
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



MSc. Oscar Rosales E.
DOCENTE FICAYA

MSc. Melissa Layana
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004142871		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cabrera Montenegro Estefanía Belén		
DIRECCIÓN:	Ibarra - Imbabura		
EMAIL:	ebcabreram@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0987446119

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004406177		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vega Tamba Joe Carlos		
DIRECCIÓN:	Antonio Ante - Imbabura		
EMAIL:	jvegat@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0980756707

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DEL RETROCESO GLACIAR EN LOS ANDES DEL NORTE DEL ECUADOR DURANTE UN PERÍODO DE 30 AÑOS EMPLEANDO TELEDETECCIÓN
AUTORES:	Cabrera Montenegro Estefanía Belén Vega Tamba Joe Carlos
FECHA:	31 de enero del 2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	

PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	Ing. Gabriel Alexis Jácome Aguirre MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de enero de 2022



.....
Cabrera Montenegro Estefania Belén
CI: 1004142871



.....
Vega Tamba Joe Carlos
CI: 1004406177

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, por estar en días de tristeza y dificultad donde todo parecía imposible, sin embargo, mediante él todo se esclareció permitiéndonos ser fuertes y contantes hasta el punto llegar a ser lo que más anhelamos que es ser ingenieros.

Agradecemos de forma muy especial a nuestras familias y amigos, por la confianza, cariño y apoyo incondicional depositado sobre nosotros a través de esta etapa universitaria.

A la Universidad Técnica del Norte especialmente a los docentes que conforman la carrera de Recursos Naturales Renovables, por haber inculcado una basta cantidad de conocimientos y enseñanzas las cuales crearon experiencias únicas a lo largo de nuestra formación académica y a su vez crearon profesionales de bien para la sociedad.

De forma especial agradecemos a nuestro director de tesis Ing. Gabriel Jácome MSc., por orientarnos y estar pendiente de nosotros a través de este proceso de titulación, así como a nuestros asesores el Ing. Oscar Rosales MSc., Ing. Paul Arias MSc, e Ing. Melissa Layana MSc., por sus indicaciones y correcciones brindadas que fueron un punto vital para la culminación del proyecto.

Finalmente, queremos agradecer a todos quienes nos apoyaron directa e indirectamente en el desarrollo de nuestra investigación.

Belén y Joe

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre Ramiro Cabrera y a mi madre Maura Montenegro por su amor, comprensión, por su ejemplo de lucha y perseverancia ya que gracias a su esfuerzo y sacrificio he podido cumplir una meta que desde el principio juntos compartimos.

A mis hermanos Efraín, Brenda y Misael por creer en mí, por apoyarme en lo que les fue posible y porque este logro es también de ustedes y para ustedes. A mis abuelitos, cuñada, sobrinos y tíos quienes con palabras de aliento me motivaban a seguir adelante sin mirar atrás.

A Joe Vega mi querido amigo y confidente, un hombre determinado e inteligente quien ha estado en las buenas y en las malas en toda mi vida universitaria, que con sus ocurrencias me alegra la vida y con sus consejos me hace volver a soñar, por su amor y apoyo en los momentos indicados, además mi compañero de tesis, ¡lo logramos!

A mis mejores amigos Karlita C., Paul Ch., Nathaly C., Bryan V., Cristian J., Joselyn P., Mishell G., Vivi E., Jimmy V., Pablo C. y Francisco Ch. Mi vida universitaria no hubiera sido lo mismo sin ustedes, tal vez no nos volvíamos a juntar en un aula de clase, pero cada momento compartido ha hecho de este proceso uno de los mejores de mi vida.

**Con amor,
Belén Cabrera**

DEDICATORIA

La culminación de una etapa más en mi vida se lo dedico a quien me ha guiado desde siempre, quien ha estado en los buenos y malos momentos desde el principio, quien me ha brindado consejos de bien tanto en mi vida académica como personal, el motor de mi vida, la persona por quien me desvelo y amo sin condición mi madre Nancy Tamba, gracias por ser la luz que me guía todos los días y me enseña valores que me convierten en una mejor persona cada día.

A mi padre Carlos Vega, por ser el pilar fundamental por el que se sostiene mi familia, además de ser aquella persona que me motiva a seguir adelante y me demuestra que con esfuerzo y perseverancia se puede lograr grandes objetivos.

A mis hermanos, que desde un inicio han estado en las buenas y las malas brindándome su apoyo en lo que les fue posible y porque este logro es por ustedes y para ustedes.

A Belén Cabrera, por ser una mujer inteligente y afectuosa de aquellas que son incondicionales en la vida y que por suerte coincidí desde el principio convirtiéndose en mi confidente y consejera, con quien compartí grandes aventuras y disfruté de la etapa universitaria.

A mis amigos que hicieron de la universidad un lugar ameno a través de los viajes y momentos compartidos dentro de las aulas demostrado que la vida es mejor con amigos.

Finalmente, dedico este logro a familiares y personas las cuales han estado al tanto de mi vida universitaria y que a su modo me han brindado unas palabras de motivación en momentos de dificultad.

**Con amor,
Joe Vega**

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
Capítulo I.....	15
Introducción	15
1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte	15
1.2. Problema de investigación y justificación.....	18
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos	21
1.3. Pregunta directriz de la investigación	21
1.4. Hipótesis.....	21
Capítulo II	22
Revisión Literaria.....	22
2.1. Marco teórico referencial	22
2.1.1. Glaciar	22
2.1.2. Formación del hielo glaciar.....	22
2.1.3. Tipos de glaciares.....	23
2.1.4. Geoformas glaciares.....	24
2.1.2. Los Andes	26
2.1.2.1. Los Andes del Ecuador	26
2.1.3. Dinámica glaciar	28
2.1.4. Retroceso glaciar.....	28
2.1.5. Teledetección espacial	29
2.1.5.1. Espectro electromagnético	29
2.1.5.2. Imágenes satelitales.....	30
2.1.5.3. Pre-procesamiento.....	30
2.1.5.4. Procesamiento	32
2.1.5.5. Clasificación digital	32
2.1.5.6. Sensores pasivos	33
2.1.5.7. Sensores activos	34
2.1.6. Análisis multitemporal del retroceso glaciar.....	34

2.1.7. Variabilidad climática	35
2.1.7.1. El cambio climático como causa del retroceso glaciar	36
2.2. Marco legal.....	37
2.2.1. Constitución de la República del Ecuador	37
2.2.2. Acuerdos internacionales	38
2.2.2.1. Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	38
2.2.2.2. Protocolo de Kyoto	38
2.2.3. Plan de Creación de Oportunidades 2021	38
2.2.4. Código Orgánico Ambiental (COA)	39
2.2.5. Reglamento al Código Orgánico Ambiental	39
Capítulo III.....	40
Metodología	40
3.1. Descripción del área de estudio.....	40
3.2. Métodos.....	43
3.2.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales ...	43
3.2.1.1. Pre-procesamiento de imágenes satelitales	47
3.2.1.2. Procesamiento	48
3.2.1.3. Coeficiente Kappa.....	51
3.2.1.4. Medición de áreas y cálculo del porcentaje de retroceso	52
3.2.1.5. Análisis multitemporal de cambio de cobertura glaciar.....	52
3.2.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar.....	53
3.2.2.1. Recopilación de información	53
3.2.2.2. Análisis de las variables climatológicas.....	55
3.2.2.3. Relación de la variabilidad climática y el retroceso glaciar.....	58
3.2.3. Proyección futura del retroceso glaciar.....	58
3.2.3.1. Tendencias del retroceso glaciar del Nevado Cayambe.....	59
3.2.3.2. Generación de cartografía de la proyección futura	59
Capítulo IV.....	60
Resultados y Discusión	60
4.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales	60
4.1.3. Matriz de contingencia e índice Kappa.....	61

4.1.4. Estimación del retroceso glaciar del nevado Cayambe.....	63
4.1.5. Cálculo de tasa de cambio anual	66
4.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar ..	67
4.2.1. Análisis climático.....	67
4.2.1.1. Análisis climático mensual	71
4.2.2. Tendencia de variabilidad climática.....	73
4.2.3. Relación entre tendencias de variabilidad climática y retroceso glaciar	75
4.3. Proyección futura del retroceso glaciar.....	79
4.3.1. Tendencia del retroceso glaciar del nevado Cayambe	80
4.3.2. Cartografía temática de la proyección futura	82
Capítulo V	84
Conclusiones y Recomendaciones	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Recomendaciones.....	86
Referencias.....	88
Anexos	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Imágenes satelitales Landsat descargadas</i>	444
Tabla 2. <i>Valoración del coeficiente Kappa</i>	52
Tabla 3. <i>Significancia de la prueba Mann Kendall</i>	577
Tabla 4. <i>Rango de valores de correlación r</i>	588
Tabla 5. <i>Valores del índice Kappa para cada año de estudio</i>	61
Tabla 6. <i>Matriz de contingencia de la clasificación supervisada de la imagen Landsat 2017</i>	62
Tabla 7. <i>Superficie y porcentaje del retroceso glaciar obtenidas en la clasificación supervisada (1991-2017)</i>	655
Tabla 8. <i>Tasa de cambio anual del nevado Cayambe obtenidas de la clasificación supervisada</i>	677
Tabla 9. <i>Resumen de la estadística de scriptiva de temperatura de las estaciones del período (1990-2020)</i>	688
Tabla 12. <i>Tendencias de precipitación mensuales de las estaciones</i>	755
Tabla 13. <i>Tendencias de temperatura y precipitación de la estación Tomalón Tabacundo</i>	766
Tabla 14. <i>Escenario futuro de la superficie glaciar del nevado Cayambe</i>	809

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Tipos de glaciares</i>	244
Figura 2. <i>Geoformas glaciares</i>	26
Figura 3. <i>Ubicación del nevado Cayambe</i>	40
Figura 4. <i>Edificios principales del volcán Cayambe</i>	41
Figura 5. <i>Imágenes satelitales Landsat del volcán Cayambe, bandas RGB 543455</i>	
Figura 6. <i>Bandeado de imágenes satelitales (RGB 543) imágenes corregidas</i> ..	466
Figura 7. <i>Acumulación de nieve en la parte nor-occidental del volcán Cayambe, RGB 543</i>	488
Figura 8. <i>Ubicación de las estaciones meteorológicas</i>	546
Figura 9. <i>Clasificación supervisada del volcán Cayambe</i>	60
Figura 10. <i>Gráfico de dispersión del coeficiente de correlación de las áreas del retroceso en función de los años</i>	633
Figura 11. <i>Retroceso del nevado Cayambe en los diferentes años en función del año 1991</i>	644
Figura 12. <i>Diagrama ombrotérmico anual de la estación Tomalón-Tabacundo</i>	699
Figura 13. <i>Diagrama ombrotérmico anual de la estación La Tola</i>	70
Figura 14. <i>Diagrama ombrotérmico de la estación Tomalón-Tabacundo</i>	71
Figura 15. <i>Diagrama ombrotérmico de la estación La Tola</i>	72
Figura 16. <i>Regresión cuadrática de las variables climáticas de la estación Tomalón Tabacundo</i>	777
Figura 17. <i>Resultado de la regresión cuadrática del área en función del tiempo</i>	81
Figura 18. <i>Retroceso del nevado glaciar en los años 2030, 2040 y 2050</i>	823

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍAS EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

ANÁLISIS DEL RETROCESO GLACIAR EN LOS ANDES DEL NORTE
DEL ECUADOR DURANTE UN PERÍODO DE 30 AÑOS EMPLEANDO
TELEDETECCIÓN

Proyecto de trabajo de titulación

Estefanía Belén Cabrera Montenegro y Joe Carlos Vega Tamba

RESUMEN

Los glaciares de los Andes ecuatorianos han experimentado pérdidas de cobertura glaciar a causa de diversos factores antrópicos que propician el cambio climático. Este estudio tuvo como objetivo generar información cuantitativa, donde se detecta y localiza la pérdida de la cobertura glaciar del nevado Cayambe siendo el área de estudio de interés para las últimas tres décadas (1990, 2010 y 2020) mediante imágenes satelitales Landsat, como estos cambios se relacionan con las tendencias de variabilidad climática y como estas pueden continuar con el pasar de los años por medio de una proyección futura. El resultado del cambio en la cobertura glaciar se obtuvo mediante la digitalización en pantalla de imágenes satelitales y el cálculo de las áreas de los polígonos resultantes. Se realizó un análisis de las tendencias de variables climáticas (precipitación y temperatura) mediante la prueba de Mann Kendall y su relación con el retroceso glaciar. Con las áreas obtenidas se aplicó el modelo matemático de la proyección futura del retroceso glaciar y la tendencia de decrecimiento. De acuerdo con los resultados obtenidos, el nevado Cayambe tuvo un retroceso de 30.09% durante los últimos 30 años, donde el aumento de temperatura es evidente desde el año 2012. Sin embargo, las tendencias de las variables climáticas no son significativas, pero presentan tendencias crecientes para la temperatura y decrecientes para la precipitación, por lo que tienen una relación del 4 al 7% con el retroceso glaciar, aunque no es un valor alto, se infiere que si presentan relación. La información obtenida con la proyección futura determinó que para el año 2050 el glaciar tendrá un área de 6.1 km² y para el año 2080 desaparecerá. En conclusión, el nevado Cayambe se encuentra en retroceso constante con la variación de los años y el cambio climático se hace cada vez más evidente, a pesar de que se presentó datos estadísticamente no significativos, si muestran relación entre el cambio climático y el retroceso glaciar.

Palabras clave: Retroceso glaciar, variabilidad climática, proyección futura.

ABSTRACT

The glaciers of the Ecuadorian Andes have experienced losses of glacial cover due to various anthropic factors that promote climate change. This study aimed to generate quantitative information, where the loss of the glacier cover of the Cayambe snow is detected and located, being the area of interest for the last three decades (1990, 2010 and 2020) by means of Landsat satellite images, how these changes relate to trends in climate variability and how these can continue over the years through a future projection. The result of the change in glacier coverage was obtained by digitizing satellite images on-screen and calculating the areas of the resulting polygons. An analysis of the trends of climatic variables (precipitation and temperature) was carried out using the Mann Kendall test and its relationship with glacier retreat. With the obtained areas the mathematical model of the future projection of the glacier retreat and the trend of decrease was applied. According to the results obtained, the snowy Cayambe had a decline of 30.09% during the last 30 years, where the increase in temperature is evident since 2012. However, the trends of the climatic variables are not significant, but they present increasing trends for the temperature and decreasing for the precipitation, so they have a relationship of 4 to 7% with the glacier retreat, although it is not a high value, it is inferred that they are related. The information obtained with the future projection determined that by the year 2050 the glacier will have an area of 6.1 km² and by the year 2080 it will disappear. In conclusion, the snowy Cayambe is in constant decline with the variation of the years and climate change is becoming increasingly evident, despite the fact that statistically insignificant data was presented, show a link between climate change and glacial retreat.

Keywords: Glacier retreat, climate variability, future projection.

Capítulo I

Introducción

1.1.Revisión de antecedentes o estado del arte

Los glaciares son una de las estructuras geológicas más espectaculares y con una mayor capacidad morfogénica en el mundo esto debido a la gran diversidad de geoformas que posee y su presencia que tiene dentro del paisaje, además es muy importante debido a la funcionalidad que presentan como suministro de agua para poblaciones aledañas (Warren, 1993; Evans y Clage, 1994; Francou et al., 2000). Sin embargo, los glaciares presentan problemas de deshielo los cuales desembocan en una cadena de afectaciones como el desgaste del recurso hídrico y da paso a fenómenos meteorológicos (Belmonte, 2017; Schoolmeester y Verbist, 2018).

Los glaciares de alta montaña a través de la historia han sufrido varios cambios en su composición. Se conoce que desde el final de la Pequeña Edad del Hielo los procesos de desglaciación comenzaron a notarse en glaciares reduciendo su superficie, longitud y volumen de manera apresurada (Warren, 1993). Los glaciares al ser importantes indicadores globales de cambios en el clima son indicadores de afectaciones al paisaje, al suministro de agua y a los niveles del mar (Evans y Clage, 1994).

Estudios acerca de los glaciares han sido observados y analizados durante mucho tiempo obteniendo resultados no muy alentadores los cuales indican que con respecto a 37 glaciares estudiados alrededor del mundo la mayoría registró una pérdida del triple de su cobertura nival desde la década de los 80. Siendo aún nada alentador dicho dato debido a que para el siglo XXI (2003, 2006, 2010) datos aéreos y estudios confirmaron que la pérdida glacial ha superado con creces lo que ocurrió durante los 80's (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007; Francou, 2007). Como en el estudio realizado en el Quelccaya nevado que forma parte de los Andes peruanos, mediante mediciones realizadas en el año 1991 de área, longitud y perforaciones, encontraron que ha sufrido un cambio de 20 m en su

parte superior en referencia a la cantidad de nieve glaciaria que tuvo en el año 1976 (Silverio y Yaquet, 2003). La mayor parte de estudios realizados en las décadas de los 70's y 80's son de carácter práctico en su totalidad, debido a que no existía el uso de las imágenes satelitales por lo que el trabajo investigativo era extenso y arduo, sin embargo, los datos que se muestran en cada estudio son eficientes.

Bermex y Tejada (2010) indican investigaciones realizadas por Thompson en el período de 1994 al 2000 en Papúa Nueva Guinea por medio de imágenes satelitales y varias salidas de campo con mediciones de ancho y profundidad donde obtuvo un resultado de retroceso de 7 m anuales para los glaciares de Puncak Jaya y demuestra que el retroceso comenzó desde inicios de los 70's indicando que para la actualidad el glaciar desaparecerá por completo, por lo que ahora se extiende solo a 2 km² de ancho y 26 m de profundidad e incluso el glaciar Meren Glacier para antes del año 1994 ha desaparecido en su totalidad. El uso de imágenes satelitales para el análisis de retroceso glaciario inicia a mediados de los años 90's con el fin de comparar la situación actual con la antigüedad con el uso de Modelos de Elevación Digital (MDE), dependiendo de la disponibilidad de los sensores disponibles e imágenes para los años a estudiar (Ariza, 2006).

La principal razón del retroceso glaciario ha sido el aumento constante de la temperatura a causa de gases de efecto invernadero producidos por el ser humano lo cual ha desembocado en lo que hoy se denomina cambio climático. El aumento de temperatura en los últimos 100 años sobre la superficie de la tierra se notó debido a que en el periodo de 1976 a 2006, la temperatura media de la superficie del planeta aumentó de 0.6 a 0.9 °C, provocando que bloques de hielo se derritan y los niveles del mar aumenten (Shahzad, 2015), en los Alpes el aumento de temperatura es el doble y el cambio de las precipitaciones es evidente, aunque no sea homogéneo con el derretimiento de los glaciares (Giaccone et al. 2015). Estudio realizado en los glaciares en el norte de Tian Shan en Kazajstán y Kirguistán de retroceso glaciario y la relación con la variabilidad climática mediante el uso de sensores remotos, el procesamiento de las imágenes utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el uso de variables climáticas, análisis estadísticos de dichas

variables y su relación con el retroceso glaciar muestra que el retroceso de los glaciares de Tian Shan se correlaciona con el aumento de temperatura del aire, sobre todo el monte Tuyuksu que desde la década de 1970 hubo un fuerte aumento de temperatura y la mayor pérdida de masa glaciar con más del 21% de pérdida y una tendencia de aumento de temperatura de 1°C/año y precipitación de 11.5mm/año (Bolch, 2006).

Según Giaccone et al. (2015) mencionan que en los Alpes italianos también se produce una disminución de nieve y que está estrechamente relacionado con el aumento de la temperatura, mediante la recolección de datos meteorológicos, analizando los datos de temperatura máxima y mínima del aire, los días de lluvia, días de nieve acumulada, la nieve fresca acumulada entre otras variables realizando los índices climáticos y tendencias de aumento o disminución de dichos parámetros y una correlación con la cantidad de nieve que se ha retrocedido en un período de años, por lo que se concluye que la tendencia de aumento de temperatura es de 0.9°C y el retroceso es de 90 m de nieve en el período estudiado.

Estas fluctuaciones de temperatura y precipitación, también ha desembocado en una acelerada disminución del área y volumen de los glaciares en los Andes donde se evidenció durante el periodo de 1730-1750, como una respuesta natural del planeta (Evans y Clage, 1994). Sin embargo, el proceso de disminución de glaciares andinos comenzó a apresurarse a partir de 1976-1980 debido a la influencia humana la cual comenzó a hacerse presente y desde esos años, por ejemplo, en la Cordillera Blanca del Perú hubo un retroceso de 30% hasta el 45% en volumen de glaciares (Francou et al., 2000).

En los países como Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia que contienen el 95% de los glaciares tropicales del mundo comienzan a observar y a sentir como sus glaciares se van desmoronando a causa del calentamiento global (IPCC, 2007). A partir de 1980 en adelante muchos de los glaciares más representativos del Ecuador como el Antisana, Cayambe y Cotopaxi comienzan a percibir retrocesos considerables a causa de las fluctuaciones del clima (Francou, 2007). En el primer

inventario de glaciares de Bolivia, mediante el estudio de la cobertura aerofotográfica de la Cordillera Oriental en el año 1975 resultan que de 1826 glaciares solo 376 glaciares son estudiados en cuanto al retroceso, demostrando que hay una reducción del 48% de superficie en el período 1975 al 2006 causado por el cambio climático y el aumento poblacional (Soruco et al. 2009).

En Ecuador el retroceso glaciar avanza de forma lenta pero constante, durante los años de 1999-2000 y 2001, se realizó el estudio al glaciar sur oeste Carihuayrazo, dicho glaciar expuso la pausa que se estaba generando con respecto al retroceso glaciar en ese tiempo (Cáceres et al., 2006). Asimismo, se generó el informe “Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador” el cual evidenció la tasa de retroceso de 7 glaciares del Ecuador desde el año 1975 al 2006 (Cáceres, 2010). Como el Antisana donde se relaciona el balance de masa de la zona de ablación del glaciar, mediante la colecta de datos climáticos de precipitación y temperatura a partir del año 1995 al 2006 donde el cálculo dio como resultado un retroceso acelerado de glaciar de 159 m durante el periodo de 1995-1998 y un avance de glaciar de 40 m en los años 1999 al 2000, debido a que los glaciares tropicales reaccionan rápido a los cambios climáticos, cuando se presenta el fenómeno del Niño hay un retroceso acelerado de glaciares, en comparación de cuando se presenta el fenómeno de la Niña que aparece un efecto contrario (Manciati et al. 2011).

1.2. Problema de investigación y justificación

Actualmente se afirma que solo podrán pervivir los glaciares situados en cotas más elevadas hasta mitad del siglo, pero quizá con el pasar del tiempo esa probabilidad vaya reduciendo (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 lo que numerosas cimas ahora muestran varias geoformas propias de ambientes fríos como: roquedos, canchales, morrenas, entre otros y ya no solo glaciares como en años anteriores (Francou et al., 2011).

Las poblaciones de las zonas tropicales y subtropicales áridas/semiáridas dependen de más del 80% del suministro de agua proveniente de los glaciares (Messerli, 2001), sobre todo en época seca donde la temperatura es mayor y las precipitaciones reducidas, sirven como amortiguadores de precipitación (Kaser, 1999), y brindan agua para uso agrícola, generación de energía, riego y uso industrial o doméstico (Veettil et al., 2016), por lo que si estos glaciares desaparecen habría consecuencias en la disponibilidad de agua para las poblaciones y ecosistemas naturales (Cuadros, 2018).

Existe una red de monitoreo de los glaciares en la cordillera de los Andes en América del Sur, creada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) y otras instituciones que desde 1991 ya se encontraba en el Ecuador. Hay estudios concentrados en varios glaciares ubicados en Perú, Bolivia y Ecuador para determinar la relación clima-glaciar, mediante el estudio de la dinámica y evolución de los glaciares (Gallegos et al., 2018).

En el Ecuador se ha realizado muchos estudios mediante teledetección utilizando imágenes satelitales (LANDSAT, ASTER y ALOS), dichos estudios muestran retrocesos de los glaciares Cotopaxi con retroceso del 37% y Antisana 33% en el período de tiempo de (1979-2007); y el retroceso del Chimborazo a un 57% en el período (1962-1997). Esto comprueba que estudios mediante imágenes satelitales son eficientes permitiendo registrar el estado de recesión de los glaciares (Rabatel et al, 2013), sin embargo, Ecuador no dispone de cartografía exhaustiva ni de estudios completos sobre las coberturas de sus glaciares y la falta de información acerca de los cambios ocurridos no permite tener una visión clara de los problemas socioambientales que podrían producirse a las generaciones futuras.

El aumento de la temperatura y la disminución de precipitaciones provocó que el volcán Cayambe haya venido experimentando el retroceso glaciar desde el año de 1979 en donde mantenía una superficie glaciar de 20.64 km², para el año de

1999 su superficie disminuyó a 17.94 km² y para el año de 2009 su área total fue de 15.36 km² (Castro et al., 2018).

En el nevado Cayambe la información sobre retroceso glaciar no ha sido profundizada, actualizada, ni relacionada con las variables climáticas, sin embargo, los estudios que se han realizado solo han sido de análisis con imágenes LANDSAT que facilitan el análisis espacio temporal mediante variables cuantitativas, por lo cual es necesario aplicar diferentes metodologías de teledetección con el uso de imágenes satelitales (Fourqurean, 2014).

Con este estudio se pretende generar información cuantitativa, donde se detecta y localiza el cambio sufrido en la cobertura glaciar del nevado Cayambe en las últimas tres décadas mediante imágenes satelitales, y como estos cambios se relacionan con las tendencias de variabilidad climática y como estas pueden continuar con el pasar de los años por medio de una proyección futura, información necesaria para generar conocimiento sobre los problemas que tienen los glaciares tropicales andinos.

Dicha información generará preocupación a futuros investigadores, y a entidades gubernamentales para que se tome en cuenta a los ecosistemas vulnerables como los glaciares y puedan tomar acciones por medio del objetivo once del Plan de Creación de Oportunidades del 2021 en el que “Garantiza los derechos de la naturaleza al conservar, restaurar, proteger, y hacer uso sostenible de los recursos naturales para las actuales y futuras generaciones”; siendo los glaciares uno de los principales fuentes de agua para el consumo humano y ecosistemas prioritarios para la conservación, por lo que por medio del ordenamiento territorial se pretende extender el territorio ecuatoriano para proteger las fuentes de agua y áreas de importancia, obteniendo como meta para el 2025 tener al menos el 16.45% de territorio bajo conservación y manejo. También se toma en cuenta promover buenas prácticas para la adaptación al cambio climático y la reducción y mitigación de la contaminación por emisión de gases de efecto invernadero.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar el retroceso de un glaciar en los Andes del norte del Ecuador durante un período de 30 años empleando teledetección.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el retroceso glaciar generado en los últimos 30 años mediante un análisis espacial de imágenes satelitales provenientes de sensores pasivos en el área de estudio.
- Identificar las tendencias de variabilidad climática y la relación con el retroceso glaciar del nevado Cayambe.
- Proyectar un escenario futuro del retroceso glaciar del nevado Cayambe para los años 2030, 2040 y 2050.

1.3.Pregunta directriz de la investigación

¿Cuánto ha variado la superficie de la cobertura de nieve en el nevado Cayambe en los últimos 30 años?

¿Cuál será el escenario futuro del nevado Cayambe según el impacto causado por el cambio climático?

1.4.Hipótesis

Ho: No existe retroceso de la cobertura glaciar del nevado Cayambe en los últimos 30 años.

Ha: Existe retroceso de la cobertura glaciar del nevado Cayambe en los últimos 30 años.

Capítulo II

Revisión Literaria

2.1. Marco teórico referencial

El presente capítulo proporciona conceptos, teorías y enfoques importantes que sirven como sustento del proyecto investigativo; aportando como marco referencial para la interpretación y discusión de resultados dentro de próximos capítulos.

2.1.1. Glaciar

Alrededor del mundo existe una variedad considerable de conceptos de glaciar, uno de los más aceptados es el pronunciado en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático el cual lo define como una masa de hielo y nieve perenne que se genera sobre el suelo o que fluye pendiente abajo y que a su vez encuentra rodeado por cumbres o laderas. Es importante mencionar que la perduración de un glaciar en el tiempo dependerá en mucho de los casos de la acumulación de nieve a grandes alturas (IPCC, 2007). La importancia de los glaciares en todo el mundo es que brindan agua no solo a las personas que viven alrededor del glaciar sino también para los animales y plantas propios del ecosistema ayudando a cumplir con el equilibrio ecológico.

2.1.2. Formación del hielo glaciar

La nieve es el insumo primario a partir de la cual se crea el hielo glaciar, el proceso comienza cuando los copos de nieve se encuentran en temperaturas por debajo del punto de congelación lo cual genera que los cristales de nieve se hagan más diminutos debido a la evaporación de sus puntas y a su vez más gruesos. La nieve granular que se creó a partir de copos de nieve comienza a recrystalizarse lo cual da origen a la denominada neviza. Mientras más acumulación y compactación de neviza mayor será el espesor de hielo, por lo cual, si se supera los 50 m, el peso es suficiente para fusionar la neviza y formar el denominado hielo glaciar (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

2.1.3. Tipos de glaciares

La clasificación de los glaciares se lo realiza analizando dos factores esenciales los cuales son el tamaño y la topografía que los envuelve. A continuación, se presentan los tipos de glaciares más notorios que se puede observar dentro de la zona de estudio.

- **Glaciares Alpinos**

“Son glaciares pequeños que se localizan en zonas altas de montaña y valles, son relativamente pequeños a comparación con glaciares de la Antártida” (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005). Los glaciares alpinos se clasifican de la siguiente manera:

- a. Glaciar de Valle**

Son aquellos glaciares donde la masa de hielo no recubre en su totalidad la topografía, más bien solo cubren una pequeña parte debido a que los sistemas montañosos no tienen grandes alturas y solo se forma el glaciar en la parte más alta porque alcanza a una temperatura bajo cero grados centígrados. Los glaciares de valle son más notorios de identificar en sistemas montañosos como los Andes, debido a que es allí donde se observa como confluyen las descargas de hielo hacia valles (Figura 1a) (Aguilón, Barrales y Galván, 2011).

- b. Glaciar de circo**

Pequeñas masas de hielo que se forman en una cuenca circular o en las cabeceras de los valles debido al acopio de nieve o por alimentación de un glaciar mucho más grande, se encuentran en todos los nevados de las cordilleras del mundo ya que son muy comunes y fáciles de identificar ya que son formados por la gran mayoría por horns de hielo (Figura 1b). Se debe acotar que la suma del glaciar de valle y de circo resulta en la formación de glaciares alpinos (Aguilón, Barrales y Galván, 2011).



Figura 1. *Tipos de glaciares:* Glaciares alpinos. a) Glaciar de Valle, nevado el Altar del Chimborazo – Ecuador. b) Glaciar de Circo, glaciar de Peñalara, Madrid – España.

Fuente: (Guerrero, 2012).

2.1.4. Geoformas glaciares

- **Circo glaciar**

Los circos glaciares son considerados como estructuras que abarcan varios kilómetros y son depresiones cóncavas, las cuales están sujetas a laderas abruptas y se encuentran acumuladas por hielo. Generalmente, dichos circos poseen paredes con características fragmentadas, así como superficies basales blandas (Figura 2a) (Gutiérrez, 2005). Se forman en gran parte por la erosión de las paredes montañosas o la formación de un nuevo valle glaciar y se los puede encontrar en una gran variedad de situaciones topográficas a condición de que la divisoria que domina el circo se encuentre a los 2 000 m.s.n.m. Una manera sencilla de identificar un circo glaciar es porque se asemeja a una laguna y sobresale el río glaciar (García, Gómez, Ortigosa y Martí, 1999).

- **Morrenas**

Las morrenas son consideradas como cordilleras glaciares con tamaños variables que abarcan desde metros hasta kilómetros, dichas cordilleras son el resultado de la acción de la sedimentación glaciar o acción de las masas de hielo, las cuales están compuestas por un conjunto de material denominado till y

depósitos fluvioglaciares (Figura 2b) (Gutiérrez, 2005). Se forman por los fragmentos que caen desde las laderas sobre el hielo del glaciar, o por materiales que hayan caído en la zona de sedimentación y son recubiertos de nieve; otro tipo de formación de esta geoforma es cuando hay un retroceso del hielo continuo y son las rocas que están abandonadas; este tipo de geoforma se encuentra en el lecho, bajo el hielo o en las partes que hay deshielo y se las identifica porque son a acumulación de rocas ya sean pequeñas o grandes rocas (Serrano, Trueba y San José, 2011).

- **Aristas y Horns**

Las aristas y horns son rasgos que se generan en la cumbre de los nevados con formas piramidales y sinuosas, la diferencia de ambas radica en que los picos rocosos llamadas horns provienen de la coalición de varios grupos de circos el cual resultan en la creación de horns solitarios. En el caso de las aristas estas son picos que se originan o crean en los lados opuestos de una divisoria de dos circos (Figura 2c) (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005). Se forman porque presentan un deslizamiento rotacional que erosiona el fondo de la cuenca, pero no sus bordes causando la forma de cuenco o púa, contribuye a la formación de circos glaciares y morrenas, son fáciles de identificar ya que son las geoformas que más se destacan en un glaciar por la forma de pirámide y muchas veces con puntas de hielo, se encuentran en las partes más alta de los nevados (Serrano, Trueba y San José, 2011).



Figura 2. *Geoformas glaciares:* a) Circos glaciares, Tjønnholstinden – Noruega. b) Morrenas glaciares, Glaciar de Coronas – España. c) Horns glaciares Los glaciares National Park – La Patagonia.

Fuente: (Franco, 2015).

2.1.2. Los Andes

La cordillera de Los Andes es una cadena de montañas que se extiende en el oeste de América del Sur, paralela a la costa del Océano Pacífico. Se extiende desde Argentina hasta Colombia y parte de Venezuela. Sus límites comprenden los 11° de latitud norte y los 55° de latitud sur, considerada como la cordillera más larga del mundo con 7 500 km de longitud y con una altura promedio que ronda los 4 000 m (Food and Agriculture Organization, 2014).

La creación del sistema montañoso de los Andes durante la era del Cenozoico tuvo consigo una serie de procesos geológicos como subducción, acreción y vulcanismo (Jácome et al., 2020). El paisaje de América del Sur tuvo un giro de 360° con la formación de los Andes debido a que permitió la formación de glaciares tropicales muy importantes para investigaciones (Pérez, Cuervo y Lamus, 2015). Los Andes cuentan con más del 99% de los todos glaciares tropicales habidos en el mundo (Kasser, 1999).

2.1.2.1. Los Andes del Ecuador

La formación geológica de los Andes dentro del Ecuador ha permitido crear tres regiones geográficas que son bastante distinguibles las cuales son Costa, Sierra y Oriente. La Sierra al ser una región con grandes montañas posee volcanes

y glaciares que se extienden a través de la cordillera Occidental y Oriental de los Andes (FAO, 2012).

Glaciares como el Antisana, Cotopaxi y Chimborazo que se encuentra en la parte Occidental han sido objetos de estudio para determinar el retroceso glaciar. En un estudio realizado se mostró que desde el año de 1997 la cobertura glaciar en Ecuador era de 60 km², pero conforme ha ido avanzando el tiempo esta disminuyó en un 38 % (Cáceres, 2010). Los estudios de los diferentes glaciares del mundo y el Ecuador sirven como línea base para ver lo que sucede en glaciares.

- **Volcán Cayambe**

El nevado Cayambe es uno de los centros volcánicos de la cordillera occidental de los Andes, más altos que se encuentran en el Ecuador, tal es así que se posiciona en tercer lugar solo por debajo del Chimborazo y Cotopaxi (Detienne et al., 2017).

Se considera como un volcán activo por lo que ha presentado actividad en los últimos 4000 años como muestran estudios tefracronológicos realizados en turberas, presenta por lo menos 21 eventos volcánicos entre los años 3800 a los 1100 antes del presente, así como también la última erupción ocurrió en los años 1785-1786 considerada erupción sub glaciar donde hubo caída de ceniza y finalizando con un flujo de lava (Ascázubi, 1802). Según Galárraga, (2018) y el boletín especial emitido por el IG-EPN menciona que se encontraron anomalías sísmicas en junio del 2016 en la zona este del volcán y que se relacionan con la fractura interna de las rocas el cual, tuvo un registro de 1600 de este tipo de evento considerado uno de los más intensos desde 1995. Al realizar la evaluación de los escenarios futuros de posibles actividades sísmicas y eruptivas se prevé que en los próximos 10 años puede ocurrir eventos volcánicos como en el año 1785 y eventos sísmicos como en el 2016 (Galárraga, 2018).

Este volcán también es considerado como parte de un ecosistema de protección por lo que se encuentra dentro de un área protegida que es el Parque Nacional Cayambe Coca, pero a pesar de la importancia que tiene este glaciar y la

protección que se le brinda a este ecosistema no se descarta el problema que presenta a consecuencia de los cambios de temperatura ocasionados directa o indirectamente por el ser humano, enunciado que se demuestra en el estudio realizado por Gallegos et al. (2014) mencionan que desde el año 1979 al año 2009 este nevado presenta cambios en su cobertura glaciaria presentando un retroceso glaciario de 25.58% lo que significa que retrocede en una tasa de 0.176 km²/año y como consecuencia de ello se ha podido observar en los diferentes flancos muchas geoformas glaciares con una composición de rocas con mayor frecuencia las andesitas y dacitas (Samaniego et al., 1998).

2.1.3. Dinámica glaciaria

Un glaciar es una masa de hielo que constantemente está perdiendo hielo, debido a sus dos zonas las cuales se denominan de acumulación y ablación. La zona de acumulación hace referencia a la acumulación de masa de nieve y formación de hielo en la parte superior del glaciar. Con respecto a la zona de ablación esta hace mención a la zona donde se pierde parte de la masa glaciaria depositada en la zona de acumulación, resultante de procesos de deshielo y desprendimientos frontales. Es importante matizar que la zona de acumulación es mayor que la zona de ablación hasta la línea de equilibrio (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

2.1.4. Retroceso glaciario

Los glaciares de alta montaña sobre todo de la región tropical son enormemente sensibles a las fluctuaciones ambientales (Hastenrath y Ames, 1995). La pronta respuesta de los glaciares hacia las variaciones climáticas ha permitido observar como las capas de hielo de sus cimas desaparecen dando paso al retroceso del glaciar, estudios realizados en México en los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl Aguilón, Barrales y Méndez (2011) mencionan que han bajado el 60% de los glaciares de aquellos volcanes, por el aumento de la temperatura que se ha acelerado en los últimos 15 años a causa de que se encuentran a mayor altitud alcanzando la línea inferior, y los glaciares son más

propensos a desaparecer debido a factores como la fusión glaciaria o derretimiento del hielo (Gil, 2012).

La manera más común de identificar el retroceso es a través de la determinación de morrenas la cual es el material como suelo y roca dejada por un glaciar retrocedido y mediante el derretimiento de la nieve la cual crea lagos glaciares. El conjunto de morrenas y lagos artificiales facilitan la formación de diques los cuales son precursores de desbordamientos repentinos y a su vez son otro indicador del retroceso glaciario (Schoolmeester et al., 2018).

2.1.5. Teledetección espacial

La teledetección tiene como marco de estudio la adquisición de información a través de la observación, análisis y la interpretación de la superficie terrestre u otros elementos que la rodean como fenómenos atmosféricos. Esto implica que, a través de sensores remotos ubicados en plataformas como drones, naves espaciales y satélites se obtenga información de una imagen superficial a distancia sin la intervención humana (Chuvienco, 1990). La adquisición de información a distancia se genera mediante la radiación electromagnética que es emitida por un objeto o un cuerpo. Se debe tomar en cuenta que todos los cuerpos que se encuentran dentro de globo terráqueo emiten radiación electromagnética (González, Ruiz y Acosta, 2007).

2.1.5.1. Espectro electromagnético

Se llama espectro electromagnético a la organización de los valores de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética. Dentro de estas organizaciones o bandas las más conocidas para teledetección son: microondas, espectro visible e infrarrojo cercano, medio y térmico. Para el estudio de glaciares los dos últimos son los más utilizados para realizar una discriminación entre nieve de hielo y otros elementos (Ordóñez, 2012).

2.1.5.2. Imágenes satelitales

Una imagen satelital se define como el producto obtenido de la radiación electromagnética reflejada de la superficie la cual es captada por un sensor que se encuentra en una multitud de satélites que orbitan sobre la tierra. Dicha información puede contener elementos como cultivos, agua y suelo desnudo los cuales son enviados a receptores en la tierra donde se procesan y generan la imagen (García, Évora y Pérez, 2012).

- **Imágenes Landsat**

Son imágenes de uso muy popular dentro de la sociedad debido a su versatilidad de uso sobre todo en el campo geológico y ambiental. Su reconocimiento y variado uso se debe a que las imágenes que dispone son desde hace 40 años a nivel mundial. Se destaca dos satélites que orbitan actualmente los cuales son el Landsat 7 y Landsat 8, ambos equipos similares en cuanto a bandas y resolución espacial se utilizan para varios análisis espaciales y temporales combinados con sistemas de información geográfica (Jácome, Valarezo y Yoo, 2018). Además, estas nuevas imágenes están disponibles cada 16 días y cubren un área superficial de 185 x 185 km, sin embargo, esto no los exceptúa de que puedan tener presencia de nubes lo cual perjudique en la observación y resolución de las imágenes (Mieza, Kovac y Martínez, 2012).

2.1.5.3. Pre-procesamiento

Consiste en todas las correcciones previas a la interpretación que se realicen a las imágenes satelitales, corrige distorsiones originadas por la plataforma, la rotación terrestre, el sensor o la atmósfera, correcciones que permiten determinar las coordenadas geográficas y comparar con una misma unidad de medida y darán más fiabilidad en los resultados del procesamiento de imagen mediante correcciones geométricas y radiométricas (Horning et al., 2010).

- **Corrección geométrica**

Es el cambio de posición que ocupan los píxeles de la imagen lo que permite corregir los errores sistemáticos u otros de ajuste, es necesario comparar con una misma unidad de medida entre áreas de distintos años, por lo que todas las imágenes deben ajustarse (Chuvienco, 1990).

Sin esta corrección las superficies obtenidas supondrían cambios donde no existen, por lo que se debe ajustar a 0.2 píxeles e inferior a 1 píxel para no tener un error mayor al 10% en la comparación. Para poder realizar este ajuste se debe tener una serie de puntos de control que se puede obtener de una información de una imagen que tenga buena precisión geométrica (Ponce, 2008).

- **Corrección radiométrica**

En esta técnica se modifican los números digitales originales para corregir distorsiones provocadas por la interacción con la atmósfera o problemas radiométricos del mal funcionamiento del sensor afectando el valor de los píxeles en una o más bandas espectrales y aparecen en la imagen satelital (Collet, 2010) se puede realizar la restauración de píxeles perdidos, una conversión de números digitales a parámetros físicos (Chuvienco, 1990).

- **Corrección atmosférica**

Las imágenes son afectadas por la presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa de una forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor, por lo que la radiancia detectada no corresponde a la que parte de la superficie terrestre, sino que tiene un porcentaje añadido aunque también la dispersión atmosférica no es constante sino, que determinadas zonas pueden verse más afectadas que otras además, el efecto es dependiente de la longitud de onda, y varía entre las imágenes. Uno de los métodos propuestos para corregir estas anomalías de las imágenes es la corrección del histograma por sus valores mínimos donde las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero (Chuvienco, 1995).

2.1.5.4. Procesamiento

Son todo tipo de técnicas aplicadas que permiten obtener resultados mediante la transformación de los datos de las imágenes satelitales (Horning et al., 2010). La técnica más adecuada es la que permite evadir los errores como la carencia de información y errores de falsa alarma disminuyéndolos a gran medida para obtener buenos resultados (Ponce, 2008).

2.1.5.5. Clasificación digital

Es la asignación de píxeles a clases o categorías según el valor de sus números digitales, que permite una interpretación, da de resultado una nueva imagen donde los píxeles originales se define por un numero digital que identifica cada clase. Estas clases describen distintos tipos de cubierta de una misma categoría. Las categorías no son definidas por único valor digital sino por una serie de valores próximos entre sí (Chuvieco, 1999). El resultado de las clases son regiones sobre un mapa que se presentan como un mosaico de parcelas uniformes identificada por un color cada una (Campbell, 1987).

- **Índice de normalización diferencial de nieve**

El índice de normalización diferencial de nieve (NDSI) es una medida de la magnitud relativa del cociente de reflectancia que se realiza mediante el rango visible del espectro (verde) (0.5-0.7 μ) y el infrarrojo cercano (SWIR) (1.0-3.5 μ). El NDSI permite diferenciar la nieve de otras cubiertas, como la nubosa la cual es la más difícil de manejar (Choi, 2004).

Para su cálculo el índice utiliza la siguiente ecuación

$$\text{NDSI} = [(\text{Green Reflectance} - \text{Near Infrared Reflectance}) / (\text{Green Reflectance} + \text{Near Infrared Reflectance})].$$

- **Clasificación no supervisada**

Tienen relación con el valor operativo al color o al clúster (agrupamientos), para identificar identidades. Es necesario que el analista valide el resultado de la

clasificación, en este proceso no se selecciona el algoritmo de clasificación que se va a utilizar por lo que es recomendable realizar la misma clasificación algunas veces obteniendo diferentes resultados con los que se pueden agregar para el resultado final (Vicens, 2009).

Este proceso al ser una clasificación automática no ha tenido veracidad de los datos, sin embargo, es un proceso necesario realizar para poder definir con el cual poder trabajar con los otros cálculos por lo que estudios realizados en la Sierra Nevada del Culcuy que obtuvieron mejores resultados que otras clasificaciones ya que arrojó una diferenciación de nieve óptima, arrojando resultados más apegados a la realidad (Peña, 2015).

- **Clasificación supervisada**

Según Vicens (2009) menciona que el analista indica al software como debe clasificar cada uno de los pixeles existentes en la imagen, partiendo de la definición de unas áreas de entrenamiento mediante el conocimiento de la superficie y es por esta razón que la participación del analista es muy activa al momento de clasificar la imagen satélite por este método.

Según Páez y García (2016) mencionan que la clasificación superficial es el método más eficaz para realizar el análisis de retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta ya que se apegan más a la realidad por lo que para realizar dicha clasificación se toma puntos de georreferenciación en cada uno de los nevados de la Sierra Nevada además se aplicó un algoritmo de verosimilitud que da a conocer la probabilidad de que la clase sea la correcta con el arreglo de pixeles y se logró diferenciar la nieve de cada glaciar.

2.1.5.6. Sensores pasivos

Estos sensores están compuestos por detectores que registran la cantidad de radiación electromagnética reflejada desde la superficie terrestre y los objetos sobre esta superficie (Jara, 2012). Esta radiación electromagnética reflejada está relacionada con la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, mientras que

la radiación electromagnética emitida está relacionada con la temperatura propia de la superficie terrestre. Tienen la capacidad de registrar radiación electromagnética entre la región correspondiente al espectro visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio de onda corta (Comisión Colombiana del espacio, 2007).

2.1.5.7. Sensores activos

Estos sensores tienen la capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se presente observar. Uno de ellos es el radar definido como radiómetro activo de micro – ondas, trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m y gracias a ello puede trabajar en cualquier condición atmosférica. Otro de ellos es el líder este emite pulsos de luz polarizada entre la ultravioleta y el infrarrojo cercano que se emplea como transmisor y la radiación láser es colimada y transmitida a la atmósfera y al interactuar con las partículas atmosféricas causan su dispersión en función de tipo de elemento encontrado (Chuvieco, 1995).

2.1.6. Análisis multitemporal del retroceso glaciar

Los estudios multitemporales han sido un gran aporte para la toma de decisiones en cuanto a las acciones a aplicar para prevenir o mitigar la destrucción de los ecosistemas, debido a que son estudios que arroja cambios de los ecosistemas estudiados con el pasar del tiempo mediante el manejo de imágenes satelitales que permiten analizar desde años anteriores hasta la actualidad, por lo que existen varios estudios multitemporales del retroceso glaciar en todo el mundo, pero sobre todo en Latinoamérica ya que contiene nevados tropicales que son considerados como los principales indicadores de los cambios climáticos (Páez y García, 2016).

En el análisis multitemporal realizado en la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia para los años 1986, 1996, 2007 y 2014 mediante la comparación de las imágenes Landsat y el cálculo de la tasa de pérdida del glaciar muestra que, en el período de 1986 al 2017 existió una pérdida del 68.9% del glaciar siendo una cifra bastante preocupante ya que en este estudio se estima si es que el calentamiento global sigue en aumento este glaciar podría desaparecer afectando a

los ecosistemas y las comunidades que dependen del agua que proporciona el glaciar (Páez y García, 2016). Así como también un estudio de retroceso glaciar y sus cambios temporales realizado en Colombia de la Sierra Nevada del Cocuy para los años 1992, 2003 y 2014 muestran que en el período de estudio hubo una pérdida de glaciar del 18.2 km² donde afirman que la principal razón es el calentamiento global asociado a la acumulación de los gases de efecto invernadero y adicionalmente es que las precipitaciones han disminuido haciendo al ecosistema más vulnerable ante los cambios atmosféricos que pueden presentar (Peña, 2015).

2.1.7. Variabilidad climática

El clima siempre ha sido dinámico por lo que nunca es igual o al menos similar durante dos días, meses o años eso significa que siempre está cambiando o es variable debido a los cambios de órbita terrestre, oblicuidad o en la precesión, incluso por la actividad solar, las grandes erupciones volcánicas, las variaciones en oscilaciones atmosféricas y las variaciones en la química atmosférica, entre otros (Montealegre y Pabón, 2000). Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) menciona que la variabilidad climática se entiende como las fluctuaciones de las condiciones de la atmósfera que suceden durante un período de tiempo de 30 años o más (Poleo, 2016).

La variabilidad climática se presenta en períodos de tiempo relativamente cortos en comparación al cambio climático, y se manifiesta en valores de variables climatológicas como la temperatura y la precipitación, las cuales son comparadas con un valor normal (Alzate et al., 2015). En las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita se identificó que presentan alta vulnerabilidad ante las variaciones climáticas donde se ha detectado aumentos para el período 1981-2010 de 0.1°C a 0.4°C por década para la temperatura media y de 0 a 250 mm/década en las precipitaciones medias anuales y por ende la tendencia en aumento de temperatura es evidente en las cuencas hidrográficas, aunque a nivel estadístico se registra tendencia positiva que es ampliamente influenciado 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, sin embargo, estas cuencas se cuentan influenciadas por los patrones climáticos diferentes con dos temporadas de lluvias

y dos temporadas de lluvias a menor escala que predomina en casi toda la extensión de las cuencas, por lo que, los eventos de La Niña y el Niño no parecen relacionarse de manera directa con los cambios de variabilidad en el clima, pero esta variabilidad puede producir grandes afectaciones como en el 2010-2011 una ola invernal provocando deslizamientos e inundaciones generando grandes pérdidas en esta región (Alzate et al., 2015).

Se ha considerado que la variabilidad climática y el cambio climático tienen una relación directa y que interactúan constantemente asociados a los cambios en el forzamiento radiactivo antropogénico, que tiene su origen en el efecto invernadero, es decir, que el cambio climático convierte en procesos más extremos los fenómenos de variabilidad climática, siendo posible que en los próximos años haya un desencadenamiento de fenómenos climáticos que causen inundaciones, deslizamientos, retrocesos glaciares e incendios forestales (Costa, 2007).

2.1.7.1. El cambio climático como causa del retroceso glaciar

El cambio climático es un tema que a través del tiempo ha ido adquiriendo interés entre la multitud, esto debido a la importancia que ha tenido sobre el planeta, dicha relevancia permitió que se forme la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), el cual en su artículo I define al cambio climático como “un cambio de clima atribuible directa o indirectamente a la actividad humana que trastorna la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables” (Organización de las Naciones Unidas ONU, 1992).

La expansión demográfica y el excesivo consumo de recursos naturales, ha provocado impactos a nivel global sobre los ecosistemas y sus seres vivos, esto se debe en gran parte a la producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Barros, 2005). Siendo este último el principal gas representante de las actividades humanas que aporta al efecto invernadero (Benavides y León, 2007). Según Stocker et al. (2013) menciona que debido al aumento de temperatura atmosférica a causa de gases de efecto invernadero muchos glaciares de cadenas montañosas están

desapareciendo, tal es así que más de 600 glaciares han desaparecido o van en camino a desaparecer totalmente.

Las altas concentraciones de gases de efecto invernadero dentro del planeta tierra provoca que estos absorban energía transformándose en movimiento molecular interno el cual genera el aumento de temperatura y a su vez el denominado calentamiento global (Benavides y León, 2007). Dicho calentamiento ha provocado que en los últimos años los glaciares de todo el mundo se vean afectados, perdiendo parte de su superficie de hielo que en años posteriores se observaba a simple vista (IPCC, 2007).

2.2. Marco legal

Para el marco legal se ha incluido las normas jurídicas que se relacionan al proyecto con el cambio climático y recursos hídricos, como son Constitución de la Republica vigente en la actualidad, Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Protocolo de Kyoto, Código Orgánico Ambiental, Reglamento del Código Orgánico Ambiental.

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador (2008) dicta un sinnúmero de artículos que consideran a la naturaleza como un ente con derechos, estas leyes promueven la protección y restauración del ambiente en favor de procesos de desarrollo sustentable y sostenible de los recursos naturales renovables y no renovables de la nación.

El retroceso glaciar es afectado por el cambio climático por lo que es necesario tomar en cuenta los Art. 14 que menciona el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado y para ello se debe preservar el ambiente, prevenir el daño ambiental y recuperar los espacios naturales degradados razón por la que enfatiza en el Art. 15, y Art. 411 que el Estado debe garantizar la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos

y todos los elementos del ciclo hidrológico como son los glaciares, lagos, lagunas entre otros; evitando el aumento del retroceso glaciario por medio de las emisiones de gases de efecto invernadero y con ello el calentamiento global optando por el uso de tecnologías limpias y no contaminantes.

2.2.2. Acuerdos internacionales

2.2.2.1. Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Según las Naciones Unidas (1991), en el I Congreso sobre el Clima esta convención comprende en que todos los países partes de las Naciones Unidas que firmaron estas disposiciones deberán estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impidan interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, y a un nivel para que los ecosistemas se adapten al cambio climático, y permitir el desarrollo sustentable. El Ecuador al ser un país que firmó este convenio las políticas ambientales del estado deben garantizar dichas disposiciones para evitar el cambio climático exponencial.

2.2.2.2. Protocolo de Kyoto

Hace referencia a la realización de buenas prácticas ambientales como foco de desarrollo sustentable, el uso de tecnologías y energías limpias limitadas a la emisión de gases de efecto invernadero en conjunto con las prácticas industriales que emiten dichos gases, tomando en cuenta un nivel aceptable para los ecosistemas; y el uso adecuado del suelo y las aplicaciones sostenibles en recurso forestal para no contribuir con los problemas del cambio climático (Rodríguez, 2007).

2.2.3. Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025

El cambio climático y la contaminación son de los principales problemas que tiene el país, por lo que obliga al Estado en implementar medidas de prevención, reducción, preparación y atención a desastres; por medio del aprovechamiento sostenible y equitativo de los recursos naturales a través de la economía circular

con el uso de tecnologías limpias que optimicen la producción, y otras técnicas como la recuperación de residuos, reducir el consumo energético, entre otros, reduciendo los efectos del cambio climático según menciona el objetivo 12.

2.2.4. Código Orgánico Ambiental (COA)

El Código Orgánico Ambiental (2018), en el Libro Tercero de la Calidad Ambiental, hace referencia a la realización de monitoreos y seguimientos de la calidad del aire, agua y suelo por parte de las instituciones competentes, además promover y fomentar la generación de información, así como la investigación sobre la contaminación y la pérdida de los cuerpos hídricos en todos sus estados con la finalidad de determinar sus causas, efectos y alternativas para su reducción de contaminación y conservación de los cuerpos de agua y sus estados. En el caso de glaciares los Gobiernos Autónomos y Municipios deberán brindar la información respectiva para la conservación y protección de estas coberturas. En tanto en el libro IV del presente código hace referencia a todo tipo de disposiciones en cuanto al Cambio Climático siendo de principal atención el Art. 248 donde se enfoca en los fines del Estado en cuanto a prevenir los daños ambientales para reducir los efectos del cambio climático, imponiendo a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales que deben incorporar en los planes de ordenamiento territorial medidas para responder a los efectos del cambio climático que se estipula en el Art. 252.

2.2.5. Reglamento al Código Orgánico Ambiental

Según el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019), menciona en el Título II Adaptación y mitigación del Cambio Climático y en el Capítulo I Análisis de Riesgo Climático en donde se destaca el Art. 721 que se refiere a realizar análisis de riesgo climático actual y futuro en un estudio que consiste determinar los impactos del cambio climáticos en los sistemas sociales, económicos y ambientales; como el retroceso glaciar que es un impacto negativo que afecta a todos los sistemas mencionados por lo que según el artículo propone que se debe partir por información climática histórica para proceder con proyecciones climáticas futuras, información disponibles aprobados por la Autoridad Ambiental Nacional.

Capítulo III

Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

El Ecuador contiene la Cordillera de los Andes que atraviesa el país de norte a sur y está representada por dos cadenas montañosas: la Cordillera Oriental y la Cordillera Occidental y entre ambas cadenas montañosas presentan siete casquetes glaciares (Jordan et al., 2005).

El presente estudio se lo realizó tomando como área de estudio al glaciar del volcán Cayambe, el cual se ubica en la Cordillera Oriental de los Andes (Figura 3) en la provincia de Pichincha, a 60 km al noroeste de la ciudad de Quito y a 15 km de la ciudad de Cayambe ($0^{\circ}1'30''N$, $77^{\circ}59'13,2''O$).

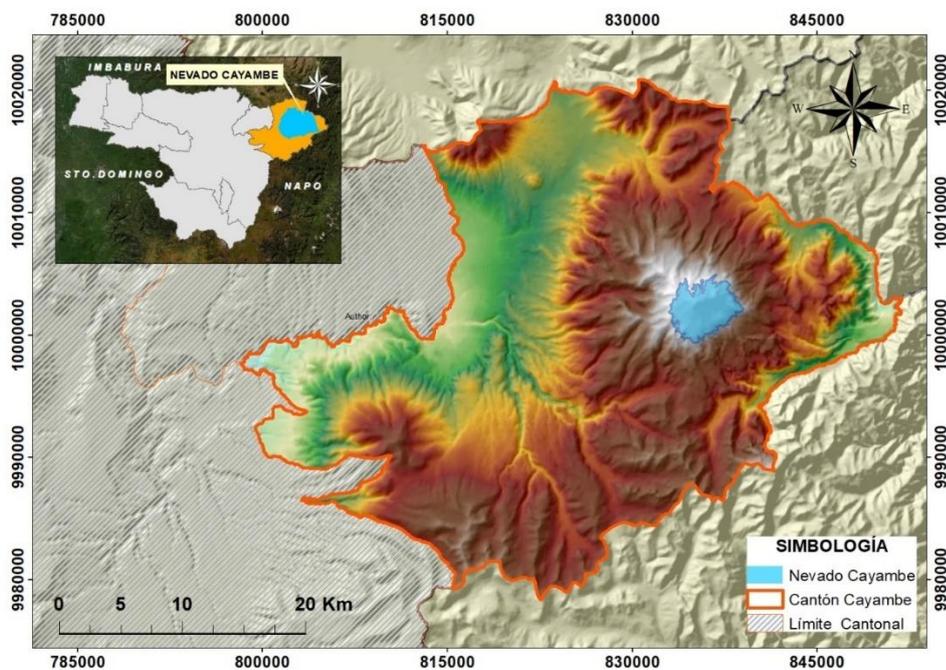


Figura 3. *Ubicación del nevado Cayambe*

Su altitud es de 5 790 msnm en su cumbre máxima siendo la tercera montaña más alta del Ecuador, volcán potencialmente activo y el único glaciar del mundo que cruza por la línea equinoccial (Samaniego et al., 2004), está cubierto por un casquete glaciar que ocupa una extensión de 15 km² 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; presenta diferentes edificios como: una cumbre Oriental llamado Axis Mundi que alcanza a los 5 487 msnm que está compuesto por un volcán con varias cumbres; un cono nombrado Ecuador donde presenta pendientes acentuadas y topografía más accidentada; y Cayambe basales uno y dos denominados “Glaciar hermoso” y “Bicentenario” respectivamente (Figura 4) se destacan por presentar pendientes suaves y valles profundos debido a la erosión glaciar (Samanieta et al., 2004).

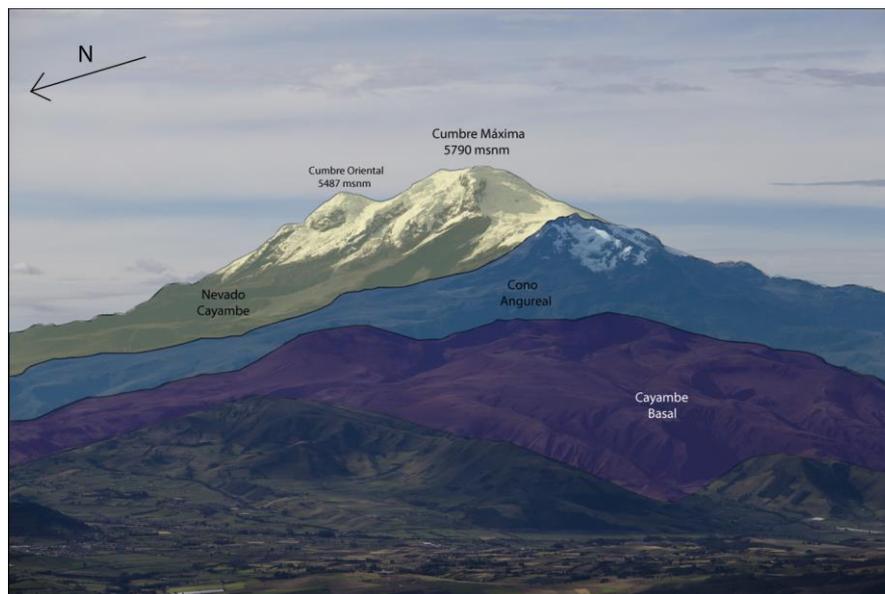


Figura 4. *Edificios principales del volcán Cayambe*

Fuente: Perrault, 2015

El nevado Cayambe se encuentra en la zona de estudio de la cuenca del Río Blanco donde existen dos estaciones lluviosas que son entre marzo y abril, y otra entre octubre, noviembre y diciembre, su glaciar se drena por dos sistemas fluviales como el río Pisque y el río Salado los caudales de estos son elevados en la época seca, que va de junio a septiembre y se producen menores niveles de precipitación en la zona y se debe a un transvase hacia la cuenca (Valencia, 2014). Según la Fundación Antisana (1998) afirma que durante la época seca hay crecidas por la presencia de precipitaciones anormales y los caudales máximos se registran en los meses junio y julio, sin embargo, el cálculo de precipitaciones anuales se registra entre los 800 y 2000 mm tanto en la cuenca como en el glaciar.

En el Parque Nacional Cayambe-Coca existen dos zonas climáticas: la zona de clima tropical mega térmico muy húmedo y la zona de clima ecuatorial de alta montaña sobre los 3000 msnm y esta pertenece al nevado Cayambe donde la temperatura oscila entre los 0° y los 20°C, dependiendo la altitud y exposición, 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, lo que da origen a precipitaciones en el flanco este del nevado y ocurren a menor altitud y mayor intensidad, comparando con 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 nor-occidente 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. La unión de los ríos Granobles y Guachalá originan el río Pisque en el sur de la planicie de Cayambe y que posteriormente forma el río Guayllabamba. Por otra parte, las quebradas del norte y nor-oriental del volcán, forman el río Azuela y la quebrada suroriental forma el río Huataringo, donde la unión de estos drenajes da origen al río Salado que desemboca en el río Coca (Samaniego et al, 2004).

La población de la ciudad de Cayambe requiere del consumo de agua y del uso de este para las actividades productivas sean agrícolas y ganaderas, por ello el estudio del glaciar del Cayambe es importante por su aportación de agua en los ríos descritos anteriormente (Valencia, Serrano y Galárraga, 2014).

El nevado Cayambe tiene diferentes tipos de ecosistemas los principales son: Bosque Siempreverde Piemontano que es el sector de la cordillera oriental, Bosque Siempreverde Montano Bajo, Bosque siempreverde Montano Alto, Bosque de Neblina Montano, Páramo de pajonal y Páramo pantanoso se encuentran en la

sección norte y centro de la cordillera oriental, Matorral Húmedo Montano Alto es la zona de las cordilleras amazónicas; en cada piso altitudinal y ecosistema se encuentra una diversidad de vegetación desde bosques de *Polylepis*, pajonales, musgos, almohadillas de páramo, hasta helechos y vegetación tropical. Entre la fauna se pueden encontrar mamíferos como osos de anteojos, lobos de páramo, pumas, venados de cola blanca, conejos de páramo; aves como el cóndor andino, reptiles y anfibios (Coloma, 2007).

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 pronunciado son de color celeste; existe una alta reflectividad al interactuar con los rayos solares esto ocurre cuando está cubierto de nieve (Brito, 2014).

3.2. Métodos

A continuación, se describe detalladamente los métodos, técnicas y procedimientos que se utilizaron en el presente estudio.

3.2.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales

El presente proyecto tuvo como período de estudio 30 años, en donde se dividió en tres subperiodos de 10 años para el volcán y se procedió a obtener dos imágenes por cada subperiodo (Tabla 1), las cuales fueron adquiridas del sitio web Earth Explorer de los sensores MSS, TM y ETM+ (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). El nevado Cayambe por sus características geográficas y su ubicación en el valle interandino de la cordillera norte del Ecuador, se ve afectado por las diferentes temperaturas lo cual generan un clima variado, fluctuantes precipitaciones y un gran porcentaje de nubes (Ortega, 2012). Dicha nubosidad se observó en las imágenes Landsat que se descargó (Figura 5), en donde la mayoría cubrían los márgenes

glaciares, lo cual impedía su geoprocesamiento. Ante aquello se analizó y se seleccionó las imágenes libres de nubosidad.

Tabla 1. *Imágenes satelitales Landsat descargadas*

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

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

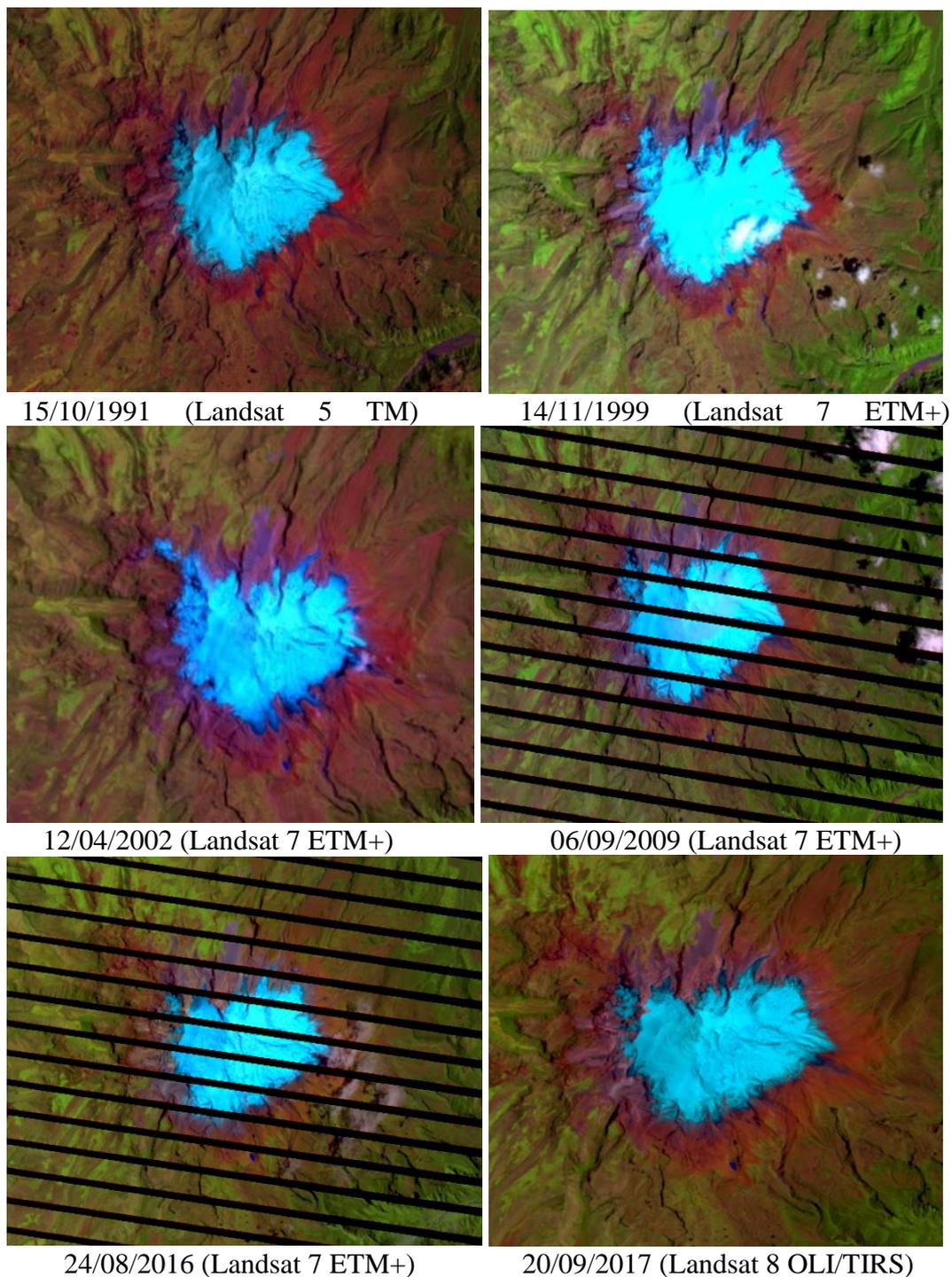
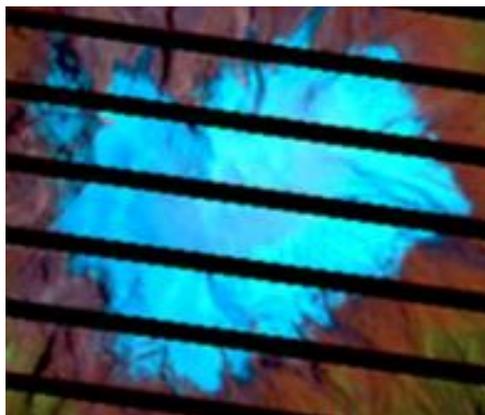


Figura 5. *Imágenes satelitales Landsat del volcán Cayambe, bandas RGB 543*

Dentro de las imágenes Landsat que se utilizaron para la digitalización hecha en pantalla de la superficie glaciaria del nevado Cayambe se observó que dos imágenes (2009 y 2016) presentaban un problema de bandeo (Figura 6) el cual

se extendía por toda la imagen generando problemas al momento de la digitalización. Brito (2014) en su investigación indica que las imágenes Landsat del año 2009 obtenidas del sensor ETM+ reflejan un inconveniente de bandeo por lo que trabajaron con dos imágenes y fotografías del mismo año para realizar la digitalización. La misma dificultad se presenta en el estudio de Torres y Vivanco (2018) en donde el problema de bandeo de imágenes se debe a la falla en el instrumento corrector de líneas escaneadas Scan Line Corrector (SLC-off) del sensor Landsat 7, por lo que las imágenes del estudio realizado por los autores resultaron con franjas de datos inválidos con una pérdida del 22% de información. Ante el problema mencionado anteriormente se procedió hacer uso de la herramienta *Gap Fill* perteneciente al software ENVI la cual permitió corregir el bandeo mediante la extrapolación de la información a alrededor de las mismas.



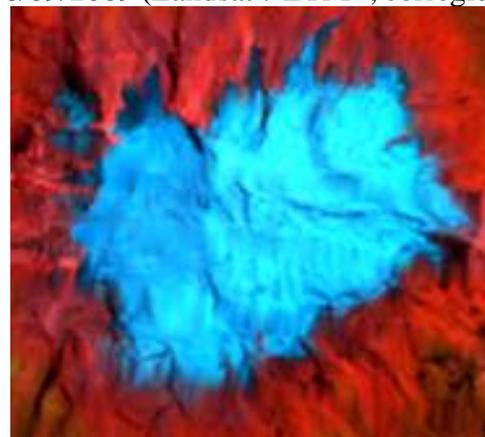
06/09/2009 (Landsat 7 ETM+)



06/09/2009 (Landsat 7 ETM+, corregida)



24/08/2016 (Landsat 7 ETM+)



24/08/2016 (Landsat 7 ETM+, corregida)

Figura 6. Bandedo de imágenes satelitales (RGB 543) imágenes corregidas

3.2.1.1. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Con las imágenes satelitales descargadas del servidor USGS Earth Explorer descritas en la (Tabla 1) se realizó diferentes procesos para lograr medir el área del retroceso glaciar a continuación se describen los procesos

- **Corrección geométrica**

Para la aplicación de la corrección geométrica se tomó en cuenta varios aspectos que son de suma importancia como el tipo de imagen debido a que las imágenes a utilizarse son producto del satélite Landsat 5, 7, 8, estas no serán forzadas a aplicar la corrección geométrica correspondiente debido a que las imágenes por su propia cuenta ya poseen datos L1Gt / L1T que indican una imagen geoméricamente corregida (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018).

En caso de que una imagen no posea un nivel de corrección alto se procedió a aplicar la georreferenciación y corrección correspondiente. Además se tomó en cuenta que mediante la aplicación de la corrección geométrica se cambiaron la posición de los píxeles originales sin trastornar sus valores (Chuvienco, 1990). El ajuste para las imágenes que presentaron deformidades se ejecutó a través del software ENVI (Kirby, 2012).

- **Corrección radiométrica**

Se utilizó para restaurar líneas o píxeles perdidos a causa de fallos en el sensor (Chuvienco, 1990). Con el archivo en formato MTL, que contiene imágenes RGB en infrarrojo, las cuales antes de cargarlas dentro del software ENVI estas deben cambiar a RGB color verdadero. Una vez iniciado el proceso se prosiguió a delimitar el área de interés mediante la herramienta *Region of Interest (ROI) Tool*. Realizado lo anterior se ejecutó la herramienta *Toolbox-Radiometric Calibration-ROI selection*, el cual permitió abrir una ventana emergente en el cual se modificaron ciertos campos como el tipo de calibración y el factor de escala. Completados los campos se procedió a aplicar *Apply FLASH Settings* el cual es una herramienta de corrección atmosférica el cual corrige y elimina las distorsiones que

la atmósfera introduce en valores de energía electromagnética emanados desde la superficie terrestre hacia el sensor (Aguilar, 2014).

3.2.1.2. Procesamiento

El reconocimiento de nieve y glaciar utilizando la teledetección, en teoría es factible, pero en la práctica no es tan simple esto debido a la reflectancia espectral de nieve y hielo la cual se modifica en función de la cantidad de distorsiones (Veetil, 2016). Según Racoviteanu et al. (2008) determina que si se identifica zonas de nieve dentro del área de estudio las mismas deberían ser excluidas del análisis de la superficie glaciar. La presencia de nieve dentro del nevado Cayambe se observó con mayor nitidez en la zona noroeste de todas las imágenes con las que se trabajó, por lo cual diferenciar entre la nieve observada y el glaciar fue difícil de digitalizar desembocando en que dicha acumulación de nieve no se incluya en los análisis de las superficies. Sin embargo, se estableció áreas donde fue posible diferenciar la nieve con respecto a grietas y nubes.

Lo antes mencionado se observó y analizó con mayor detalle en las imágenes de los años de 1999 y 2009 respectivamente (Figura 7), en donde para ambos años la acumulación de nieve en la zona noroeste es notoria sobresaliendo del límite glaciar, sobre todo para el año de 1999.

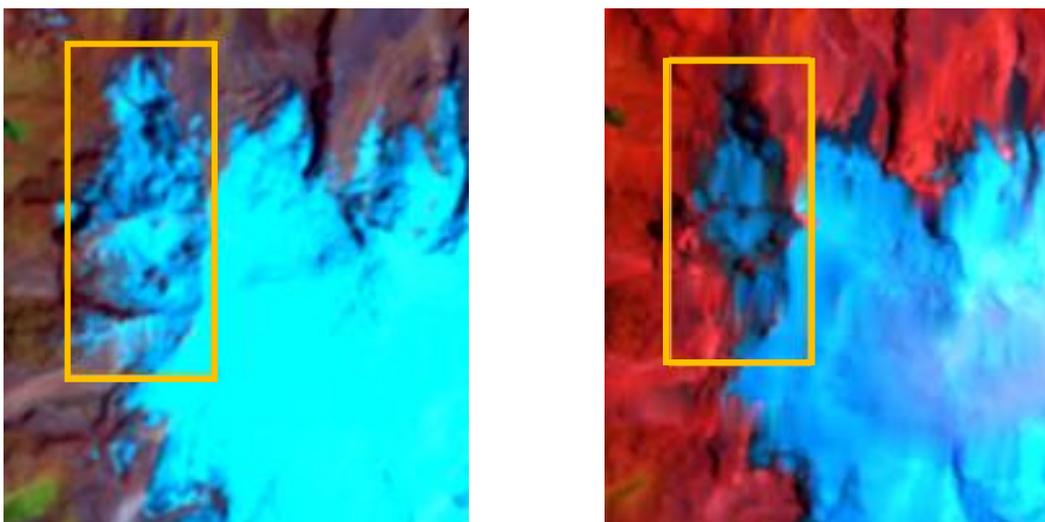


Figura 7. Acumulación de nieve en la parte nor-occidental del volcán Cayambe, RGB 543

- **Cálculo del índice de normalización diferencial de nieve**

El uso del índice de normalización diferencial de nieve (NDSI), permitió realizar una detección y discriminación de la cobertura nival con respecto a otras coberturas terrestres. Este índice se calculó mediante las bandas del canal verde de alta reflectividad y mediante el canal infrarrojo medio de baja reflectividad a través de la herramienta *Toolbox-Band Math* del software ENVI. La composición de estos dos rasgos espectrales fueron claves dentro del índice NDSI (Dozier, 1989). Para calcular el índice se utilizó la siguiente ecuación (I).

$$NDSI = [(Green\ Reflectance - Near\ Infrared\ Reflectance) / (Green\ Reflectance + Near\ Infrared\ Reflectance)] \quad (I)$$

Subsiguientemente, se estableció un umbral del índice NDSI entre 0.4 y 1 para discriminar la nieve y permitirse así obtener un primer mapa de la superficie glaciar para el volcán Cayambe. El índice se aplicó solo después de que las imágenes estén corregidas de forma geométrica, radiométrica y atmosférica (Hall et al.,1995).

El siguiente análisis permitió obtener las primeras delimitaciones de coberturas glaciares del volcán Cayambe, las cuales se obtuvieron mediante la clasificación *Raster Color Slice* la cual permitió separar la cobertura glaciar, así como analizar y sobreponer cada clasificación sobre cada imagen en RGB 542. Una vez verificado cada clasificación con respecto a sus imágenes se procedió a guardar.

- **Clasificación no supervisada**

Para la determinación de zonas con presencia de hielo se utilizó el software ENVI, el cual permitió realizar una clasificación no supervisada el cual consistió en agrupar píxeles (clúster) con valores similares en reflectancia y que pertenecen a un determinado objeto, dicha clasificación a su vez permitió generar una mejor discriminación de las clases debido a la resolución espectral de las imágenes.

El proceso en ENVI para la clasificación no supervisada se generó a partir del uso de las herramientas *Classification-Unsupervised-K-Means Classification*. Dentro de dichas herramientas se cambió el parámetro de número de clases de acuerdo con el área estudio, así como también se realizó pruebas para ver observar que clases se ajustaban de mejor forma a la cobertura glaciar (Gómez y Calderón, 2012).

Para la clasificación no supervisada de las imágenes se optó por dividirla en 5 clases (vegetación arbustiva, páramo, suelo erosionado, roca y glaciar) las cuales fueron verificadas sobreponiendo cada una de las clasificaciones sobre la imagen satelital correspondiente permitiéndose así determinar si corresponden o no a la cobertura deseada.

- **Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada permite utilizar y clasificar el ráster por medio de cada píxel de una celda, dicho proceso se realizó en el programa ENVI en donde se cargó la imagen previamente utilizada en la clasificación no supervisada, para hacer uso de las herramientas que dispone el programa ENVI. Se debe mencionar que para ejecutar una clasificación supervisada el investigador debe tener conocimiento acerca de la zona de estudio a través de salidas campo el cual permitan delimitar las diferentes coberturas.

Para determinar las áreas de interés o entrenamiento de la clasificación supervisada se hizo uso de la herramienta *Region of Interest (ROI) Tool*, la cual permitió dibujar y delimitar las áreas de interés que en este caso fueron glaciar, roca, suelo erosionado, páramo y vegetación arbustiva. Una vez obtenidas las cinco clases se utilizó la herramienta *Scatter Plot Tool* para caracterizar espectros similares, los cuales una vez determinados dieron paso a la ejecución la herramienta *Maximum Likelihood Classification* para la correspondiente clasificación.

- **Vectorización**

Las clasificaciones realizadas y corregidas se guardaron en formato ráster con el programa ENVI y para obtener el contorno glaciar de cada año cambió de formato a vector el cual se realizó mediante la opción *Raster to Vector*, que es el formato EVF y después con la herramienta *Classic EVF to Shapefile* se exportó a formato SHP para poder delimitar de manera manual los contornos que fueron obtenidos automáticamente, tomando en cuenta las imágenes satelitales como base para determinar de manera visual la cobertura y ajustar los contornos de las capas que se exportaron anteriormente.

3.2.1.3. Coeficiente Kappa

Para medir las áreas glaciares determinadas fue necesario realizar un análisis mediante el coeficiente Kappa y la matriz de contingencia para evaluar el grado de exactitud de la clasificación, siendo bidimensional y muestra la relación $n \times n$ en la cual las filas representan las clases de referencia (terreno) y las columnas las áreas de entrenamiento (mapa temático), y de manera diagonal se representa los puntos de control que coinciden con los valores de la matriz, en la cual la relación se ajusta más a la realidad del uso de suelo y del retroceso glaciar del Cayambe, este coeficiente mide el grado de concordancia inter –observador y se calcula en tablas de cualquier dimensión que representan las coberturas en una imagen temática, su rango es de -1 y +1, el valor que se acerque a 1 indicará mayor concordancia de los valores con la realidad, se construye en base a un cociente el cual incluye en el numerador la sumatoria de las concordancias observadas y la sumatoria de las concordancias atribuibles al azar, mientras que el denominador incluye la diferencia entre el total de observaciones y la sumatoria de las concordancias atribuibles al azar. Y se expresa mediante la siguiente ecuación (II), sin embargo, este coeficiente se lo realizó en el programa ENVI relacionando las áreas de entrenamiento y los supuestos con la herramienta *Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs* (Cerdal y Villaroel, 2008).

$$k = \frac{\sum \text{concordancias observadas} - \sum \text{concordancias atribuibles al azar}}{\text{total de observaciones} - \sum \text{concordancias atribuibles al azar}} \quad (\text{II})$$

Este coeficiente tiene una escala para expresar cualitativamente la fuerza de la concordancia dentro de la imagen temática generada (Tabla 2).

Tabla 2. Valoración del coeficiente Kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Fuente: (Cerdal y Villaroel, 2008).

3.2.1.4. Medición de áreas y cálculo del porcentaje de retroceso

Se realizó el cálculo del área de los polígonos resultantes de la vectorización de la clasificación supervisada por medio del cálculo geométrico del software ArcGis 10.8, posteriormente se calculó el coeficiente de correlación en función de la variable área con la variable años, para determinar si presenta 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 por cada año de estudio.

El porcentaje del retroceso fue definido mediante la comparación del área de la cubierta glaciaria del volcán Cayambe y como este ha cambiado en los períodos de estudio que son 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2020 convirtiéndolos en valores porcentuales para una mejor diferenciación y evaluación del retroceso glaciario.

3.2.1.5. Análisis multitemporal de cambio de cobertura glaciaria

A partir de los datos de área calculados (km^2) de cada subperíodo (1990, 2000, 2010 y 2020) que se obtuvo del método escogido por el coeficiente Kappa. Se determinó la tasa de cambio anual que nos indicó la pérdida de la cobertura glaciaria a través del tiempo (1990-2020), dicha tasa de cambio fue calculada a través la siguiente ecuación (III) (Bocco, Mendoza y Masera, 2001).

$$N = N_0(1 + r)^t \quad \text{(III)}$$

Donde:

N_0 = Superficie de la cobertura glaciaria 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

De la ecuación (III) se despeja la variable r (tasa de cambio) y se multiplica por 100 para obtener la tasa de cambio anual en porcentaje que se demuestra en la siguiente ecuación (IV):

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

3.2.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciario

La metodología y los análisis estadísticos utilizados para cumplir con el segundo objetivo se detalla a continuación.

3.2.2.1. Recopilación de información

La serie de datos analizados en la investigación, fueron recolectados de las estaciones meteorológicas M1094 Tomalon-Tabacundo, M0203 Reventador, M5025 La Virgen Papallacta, M5040 Tumbaco, M0002 La Tola y M0188 Papallacta del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) ubicadas cerca del volcán Cayambe. Sin embargo, solo se consideró dos estaciones meteorológicas que son M1094 Tomalon-Tabacundo y M0002 La Tola (Figura 8), debido a que las demás estaciones presentaron déficit de datos del 40 al 60%. Los parámetros meteorológicos fueron: Temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) del período de estudio.

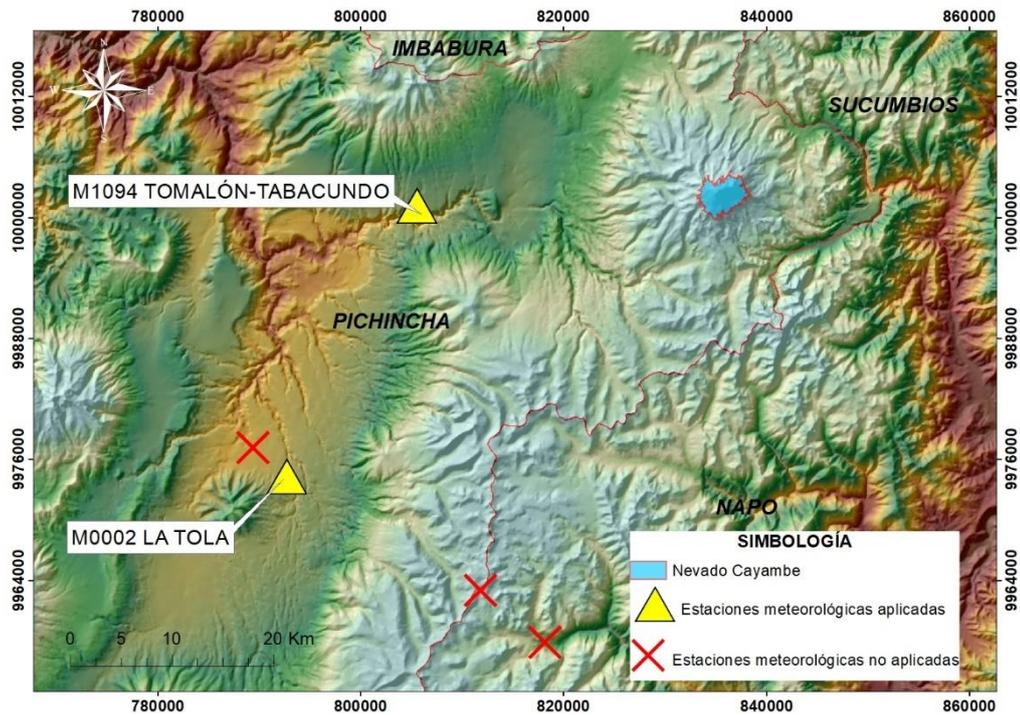


Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas

Antes del análisis se realizó el control de calidad y relleno de datos mediante el método de la razón normal el cual permitió calcular los valores faltantes y los valores no razonables considerando los promedios de precipitación y temperatura anuales de al menos dos estaciones cercanas, siendo aplicables cuando los promedios anuales de la estación a rellenar difieren más de 10% de los valores de las estaciones cercanas y se lo realizó aplicando la fórmula (V) (Carrera et al, 2016).

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (V)$$

Donde:

P_x = precipitación y/o temperatura estimada para el día con dato ausente de la estación a rellenar

n = número de estaciones cercanas

N_x = promedio anual de la estación a rellenar

N_i = Promedio anual de las estaciones cercanas

P_i = precipitación y/o temperatura observada de las estaciones cercanas para el día con el dato ausente

3.2.2.2. Análisis de las variables climatológicas

Los parámetros climáticos que se colectaron de las estaciones meteorológicas fueron analizados por medio de estadística descriptiva y análisis de tendencias. Para el análisis estadístico se analizó la media, el máximo (Máx.), mínimo (Min), la desviación estándar (D.E) y coeficiente de variación (C.V.).

- **Método estadístico de tendencias “Test de Mann-Kendall”**

Para consolidar el método estadístico de tendencias fue necesario realizar el análisis de normalidad de los datos de temperatura y precipitación, mediante el análisis de Shapiro Wilks con un nivel de confianza del 95% con el fin de observar si los datos son paramétricos o no paramétricos, utilizando el software estadístico Infostat.

La prueba de Mann-Kendall es un análisis para datos no paramétricos aplicado en estudios de identificación de tendencias en series hidrometeorológicas y otras series ambientales en función del tiempo el cual ayuda a determinar si los parámetros analizados tienden a aumentar o disminuir con el pasar de los años (Kundzewicz y Robson, 2000), dentro del presente estudio fue aplicado para los parámetros de precipitación media mensual y temperatura media mensual del período 1990-2020. 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).

Es necesario enlistar los valores de las variables en forma ordenada (X_1, X_2, \dots, X_n), para obtener el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes ($X_j - X_k$) con ($j > k$) de acuerdo con los siguientes datos:

$$\text{signo} (X_j - X_k) = \begin{cases} 1 \text{ si } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 \text{ si } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 \text{ si } (X_j - X_k) < 0 \end{cases}$$

Según el dato obtenido se realizó la prueba estadística S de Mann Kendall, mediante la siguiente ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(X_j - X_k)$$

Si el valor de S es positivo se inferirá de manera subjetiva que la tendencia es creciente, cuando S es negativo se inferirá que hay tendencia decreciente. Con base en los indicadores se estimó una varianza para el estadístico S de Mann Kendall, que consideró el caso de los empates $si (X_j - X_k) = 0$, mediante la ecuación:

$$Var[S] = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1)(2t_q+5) \right]$$

Para el cálculo del estadístico Z_{MK} después de aplicar la metodología anteriormente descrita se utilizó (VI).

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

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

- a) H_0 : No hay tendencia vs H_1 : Hay tendencia decreciente
- b) H_0 : No hay tendencia vs H_1 : Hay tendencia creciente

Las tendencias se calcularon para los parámetros de temperatura y la precipitación de los valores mensuales en las estaciones de Tamalon-Tabacundo y La Tola porque fueron las únicas estaciones con datos superiores al 80% de calidad y con menor cantidad de datos faltantes. Se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall que proporciona un valor de significancia p-value, así un valor de p-value inferior a 0.05 o nivel de significancia del 95% garantizó que la hipótesis

adoptada tiene altas garantías de veracidad (Giaccone et al. 2015); siendo el resultado de Z positivo e igual o mayor que 1.96, lo que significa la existencia de tendencia significativa creciente; si el resultado Z positivo y menor que 1.96 significa tendencia no significativa creciente, cuando el resultado de Z es igual o menor que -1.96, quiere decir tendencia significativa decreciente y si el valor Z es mayor a -1.96 indica tendencia no significativa decreciente (Tabla 3) (Alencar da Silva y Nóbrega, 2016) dicho proceso se lo realizó con el uso del software R Studio siendo un modelo propio para estudios estadísticos de todo tipo de variables por su baja probabilidad de sesgo de datos y fiabilidad de los resultados (Muñoz, 2008).

Tabla 3. *Significancia de la prueba Mann Kendall*

Significancia	Z
Sin tendencia	0
Tendencia significativa creciente	> +1.96
Tendencia significativa decreciente	< -1.96
Tendencia no significativa creciente	< +1.96
Tendencia no significativa decreciente	> -1.96

Fuente: (Alencar da Silva y Nóbrega, 2016)

- **Método no paramétrico pendiente de Sen**

Complementando a la prueba de Mann Kendall se utilizó el estadístico de pendiente de Sen, el cual fue 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 (VII) (Balakrishnan, Peña y Silvapulle, 2008).

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

Donde:

X_j y X_i = Son los datos climáticos

j e i = periodo de años

3.2.2.3. 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 4) (Hernández, 2018). También se realizó la regresión cuadrática el cual mostró en porcentaje la variabilidad de los valores y así obtener la relación entre las tendencias de variabilidad climática obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y el retroceso glaciar, con el fin de confirmar si las tendencias climáticas son unas de las razones del retroceso glaciar del volcán Cayambe.

Tabla 4. Rango de valores de correlación r

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

Fuente: (Hernández, 2018).

3.2.3. 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 (V) (Alva y Meléndez, 2005):

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

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 .

3.2.3.1. 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 el objeto de establecer las tendencias del retroceso glaciar para los años próximos. Mediante el método de Mínimos Cuadrados se evaluó la regresión cuadrática y se definió los polinomios característicos mediante la ecuación (VI) (Myers y Walpole, 1992; García y Páez, 2016).

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

Varios estudios utilizan la regresión cuadrática o lineal para obtener las tendencias progresivas de reducción de coberturas vegetales o cuerpos de agua en función del tiempo, como Condori, Loza, Mamani y Solíz (2018) en el análisis multitemporal de la cobertura boscosa de la sub cuenca del río Coroico de Bolivia realizaron una regresión cuadrática del área boscosa resultante de seis imágenes satelitales, obteniendo una tendencia decreciente de área boscosa en función del tiempo, así como también Castillo y Rodríguez (2017) un estudio realizado en la laguna de Fúquene en Colombia con el fin de determinar la disminución del espejo de agua de la laguna en función del tiempo mediante la regresión cuadrática, obteniendo resultados con tendencia decreciente.

3.2.3.2. Generación de cartografía de la proyección futura

Con los datos obtenidos por medio de la aplicación de la fórmula del cálculo de la proyección futura (V), se realizó mapas temáticos de las áreas glaciares que se obtendrán en los años 2030, 2040 y 2050 mediante el dibujo de polígonos con los valores de áreas respectivas a cada año interponiendo en la imagen satelital del año 2017, procedimiento que se llevó a cabo en el software ArcGis 10.8

Capítulo IV

Resultados y Discusión

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los tres objetivos específicos planteados en la investigación.

4.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales

Los métodos para clasificar las imágenes fueron NDSI, clasificación supervisada y clasificación no supervisada, sin embargo, tras varias revisiones bibliográficas y las salidas de campo se definió que la clasificación supervisada (Figura 9). Según Vences (2009); Páez y García (2016) mencionan que la clasificación supervisada es el método más apto para la diferenciación de glaciar y otras coberturas ya que se parte del conocimiento de la superficie para realizar la clasificación, conclusión demostrada tras realizar el análisis del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta, el presente método se comprobó mediante el coeficiente Kappa, resultados descritos a continuación.

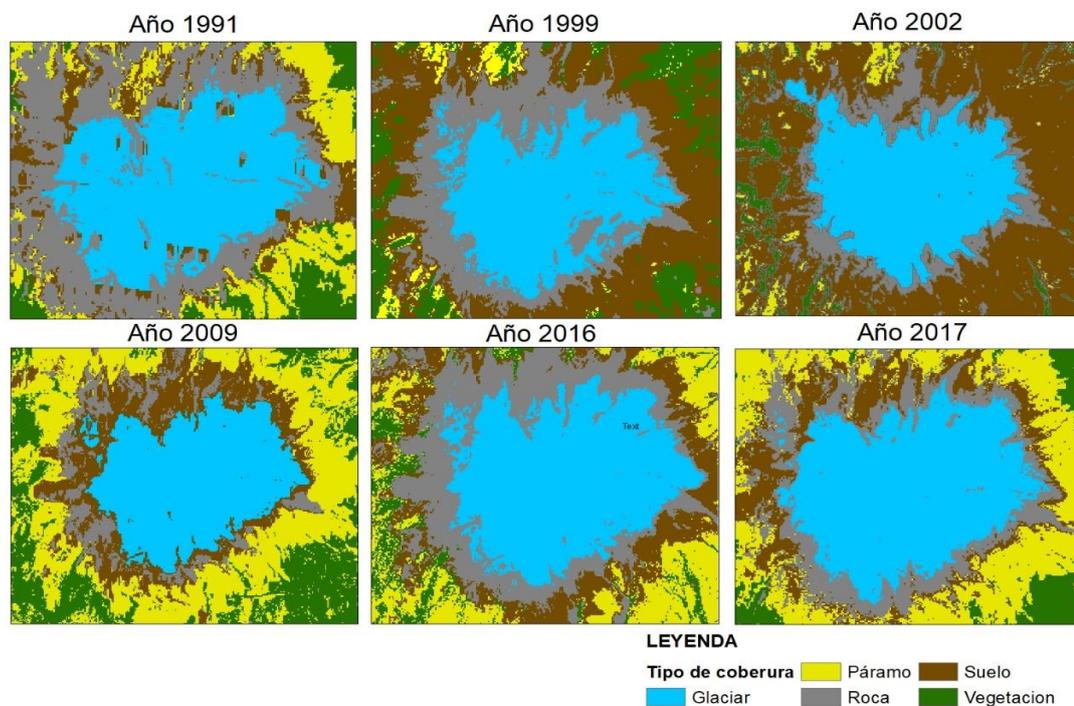


Figura 9. Clasificación supervisada del volcán Cayambe

4.1.3. Matriz de contingencia e índice Kappa

La matriz de contingencia para la clasificación supervisada fue un método que se aplicó para todas las imágenes de los tres periodos de estudio; proporcionando como resultados diferentes valores Kappa (Tabla 5). El valor más bajo obtenido fue de 0.84 en las imágenes de 1991 y 2016 mientras que el más alto fue 0.98 que corresponde a la imagen del 2017, ambos valores considerados casi perfectos dentro de la valoración del coeficiente Kappa. La clasificación supervisada muestra valores de índice kappa altos, debido a la alta semejanza entre la clasificación en software y la validación en campo, por consecuente Páez y García (2016) en su estudio toman como referencia 50 puntos aleatorios para el cálculo del coeficiente dentro de cada imagen clasificada por los métodos de componentes principales, clasificación supervisada y clasificación no supervisada para el periodo de 1986-2014, obteniendo resultados óptimos para la clasificación supervisada con valores entre 0.9 – 0.97 concluyendo que dicha clasificación se utiliza para el cálculo de tasas de retroceso del glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta.

Tabla 5. *Valores del índice Kappa para cada año de estudio*

Año	Índice Kappa
1991	0.84
1999	0.96
2002	0.94
2009	0.93
2016	0.84
2017	0.98

Al ser el índice Kappa un método de comparación de píxeles entre la precisión de la predicción y la precisión del usuario mediante la cantidad de píxeles, la imagen Landsat 8 del año 2017 (Tabla 6) al ser casi exacta mostró valores de frecuencias para la categoría 1 (glaciar) de 213 en usuario y 306 en predicción; en la categoría 2 (Roca) un valor de 49 en usuario y 56 en la predicción; en la categoría 3 (Suelo erosionado) un valor de 100 en usuario y 100 en la predicción; en la categoría 4 (Páramo) un valor 150 en usuario y 145 en la predicción; por último la

categoría 5 (Vegetación arbustiva) posee un valor 646 en usuario y 306 en predicción; lo que demostró una alta correlación entre los puntos tomados en campo y los puntos de la clasificación supervisada.

Tabla 6. *Matriz de contingencia de la clasificación supervisada de la imagen Landsat 2017*

USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	211	0	0	0	0	306	100%
Roca (2)	2	49	5	0	0	56	87.5%
Suelo erosionado (3)	0	0	95	5	0	100	95%
Páramo (4)	0	0	0	145	0	145	100%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	0	134	134	100%
TOTAL	213	49	100	150	134	646	
Precisión del usuario	99.06%	100%	95%	96.67%	100%		
Coefficiente Kappa				0.98			
Precisión				98.14%			

El índice Kappa calculado reveló que la clasificación supervisada para el año 2017 es significativa, ya que el valor obtenido fue de 0.98 que se clasifica en categoría casi perfecta, aceptando los resultados obtenidos en relación entre la predicción del software y el usuario, validando los resultados del análisis multitemporal en los periodos de estudio.

4.1.4. Estimación del retroceso glaciar del nevado Cayambe

El cálculo 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 al 1, es una correlación casi perfecta por lo que se demuestra que el retroceso glaciar se presenta con el pasar de los años (Figura 10).

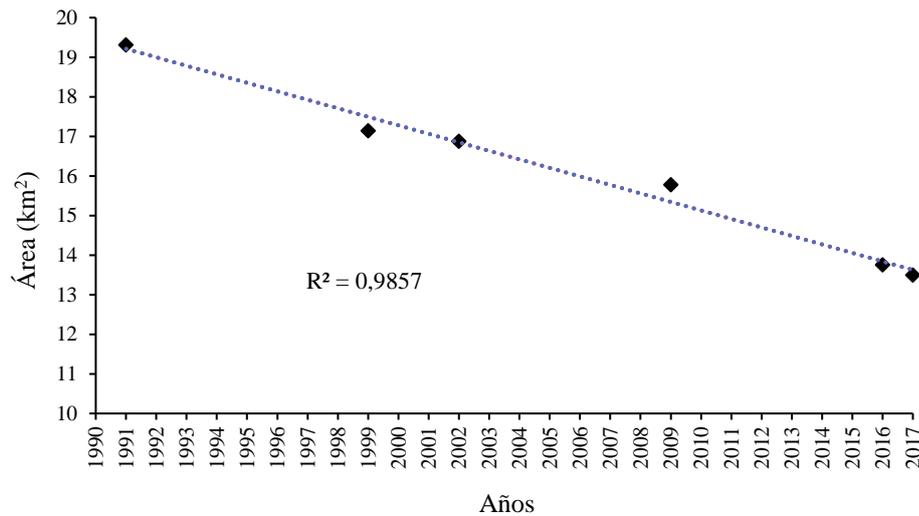


Figura 10. Gráfico de dispersión del coeficiente de correlación de las áreas del retroceso en función de los años

A través de procesos de interpretación visual y digitalización en pantalla de coberturas de nieve durante el periodo de estudio (1991-2017), se obtuvo como instrumento de soporte un mapa (Figura 11) en donde se observó de manera gráfica como las zonas de cambio de la cobertura glaciar se acentuaban sobre el nevado Cayambe. El mapa generado representó la superficie glaciar de los diferentes años en cuestión a través de diferentes colores.

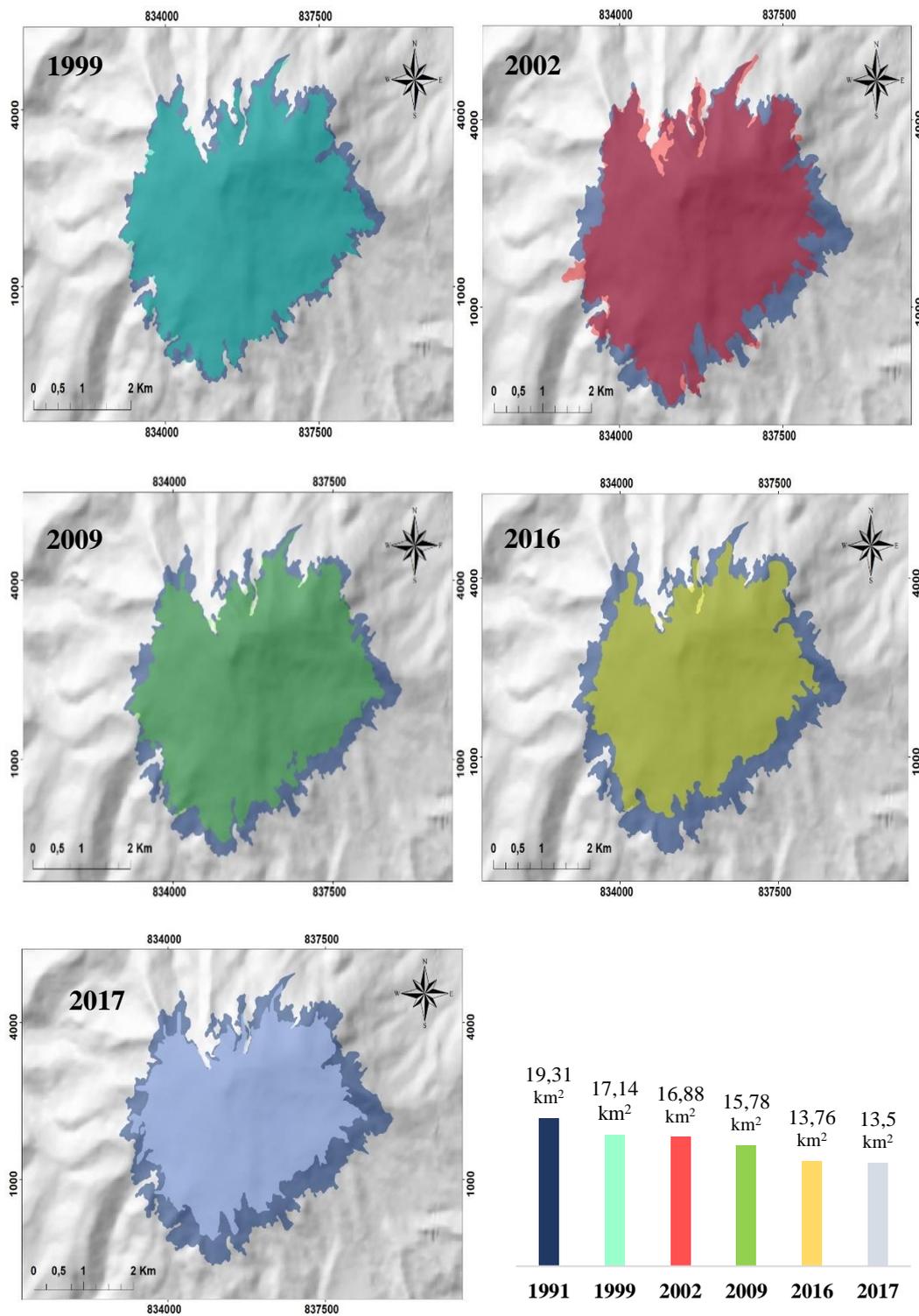


Figura 11. Retroceso del nevado Cayambe en los diferentes años en función del año 1991

El nevado Cayambe con respecto a su cobertura glaciar durante el periodo de estudio (1991-2017) alcanzó un retroceso glaciar de 30.09 % (5.81 km²), ya que el año con mayor superficie glaciar es 1991 con 19.31 km², seguido con 1999 un área de 17.14 km², el 2002 con 16.88 km², 2009 con 15.78 km², 2016 con una superficie de 13.76 km² y el año 2017 el que presentó menos superficie glaciar con un total 13.50 km² (Tabla 7).

Tabla 7. Superficie y porcentaje del retroceso glaciar obtenidas en la clasificación supervisada (1991-2017)

Año	Área (km ²)	Área perdida en relación con 1991 (km ²)	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

Gallegos et al. (2018) indican con respecto al nevado Cayambe un porcentaje de retroceso glaciar de 25.58% para el período 1979 y 2009. 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. Con lo anteriormente citado se afirma que los resultados obtenidos en el presente estudio son de valores similares, pero no iguales, obteniendo el 30.09% de retroceso glaciar.

El nevado Cayambe es importante porque aporta a varios de los recursos hídricos de los alrededores, 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 evidencian que el nevado Cayambe presenta un retroceso glaciar semejante al período analizado. Como el Iliniza Sur 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). El Iliniza, 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 se encuentran en riesgo de extinción en las próximas décadas (Cáceres, 2010).

Según Collet (2010) determina que el volcán Cotopaxi en el año 1979 tuvo una superficie de 18.33 km² y para el 2007 un área de 11.53 km², en los mismos años el nevado Antisana presenta una reducción del glaciar con una superficie inicial de 21.36 km² y una superficie final de 12.76 km² por lo que ambos glaciares tuvieron un retroceso del 40% para el periodo estudiado. Así mismo, Cáceres (2010) afirma 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%. Al contrario, según Altamirano (2019) asegura que el Chimborazo en el periodo 2000-2014 tuvo un incremento del 87.91% de superficie glaciar por lo que considera al Chimborazo un glaciar cíclico denotando subidas y bajadas de nieve debido a su altitud y diversos factores climáticos, sin embargo, las tendencias calculadas en el estudio muestran registros negativos por lo que la superficie de dicho glaciar será susceptible a la pérdida a través del tiempo.

Investigaciones en los Andes tropicales señalan los mismos estándares, aunque con valores no siempre coincidentes. En la Cordillera de Vilcanota en Perú Salzmann et al. (2013) valora la reducción ocurrida entre 1985 y 2005 en un 30% de área y 45% de volumen del glaciar. Soruco (2008) apunta una reducción del 48% en 376 glaciares del Perú entre 1975 y 2016 basado en fotogrametría aérea. En este sentido Páez y Garcia (2016) aportan un análisis multitemporal realizado en la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia con resultados para el período de 1986 al 2017 donde presenta una pérdida del 68.9% de la cobertura nivo-glaciar.

4.1.5. Cálculo de tasa de cambio anual

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 8). En cuanto a la

tasa de cambio para el período de 30 años (1990-2020) se obtuvo un valor de -1.19%.

Tabla 8. *Tasa de cambio anual del nevado Cayambe obtenidas de la clasificación supervisada*

Período	Tasa de cambio	Tasa de cambio (1991-2017)
1991 – 1999	-1.47 %	
2002 – 2009	-0.96 %	-1.19 %
2009 – 2017	-1.93 %	

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.

4.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las tendencias climáticas mediante las pruebas estadísticas. Es importante elegir estaciones meteorológicas que se encuentren en una zona con condiciones de una atmósfera homogénea y registre mediciones similares entre ellas (Herrera, Bautista y Valdez, 2010). En el presente estudio la obtención de las condiciones climáticas se estableció en el análisis de las variables de temperatura y precipitación teniendo en cuenta la representatividad y la contigüidad de las estaciones al área de estudio para el período de 30 años (1990-2020).

4.2.1. 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 (Tabla 9).

Tabla 9. Resumen de la estadística descriptiva de temperatura de las estaciones del período (1990-2020)

	TT	LT	TT	LT	TT	LT	TT	LT	TT	LT
	Med	Med	Min	Min	Max	Max	D.E.	D.E.	C.V.	C.V.
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)			(%)	(%)
Ene	14.8	15.6	13.3	14.6	16.9	17.3	0.92	0.68	6.19	4.38
Feb	14.8	15.7	13.5	14.3	16.7	17.5	0.82	0.74	5.56	4.74
Mar	14.8	15.7	13.5	14.1	16.1	16.8	0.73	0.66	4.92	4.20
Abr	14.8	15.7	13.8	14.7	16.0	16.7	0.57	0.50	3.88	3.16
May	14.9	15.8	13.7	14.9	16.2	16.6	0.61	0.44	4.12	2.78
Jun	15.1	15.8	13.7	14.9	16.4	17.2	0.63	0.53	4.19	3.33
Jul	15.2	15.7	14.3	14.5	16.3	16.8	0.56	0.53	3.67	3.38
Ago	15.5	15.9	14.3	14.7	16.8	17.2	0.61	0.57	3.96	3.57
Sep	15.4	15.8	13.7	14.5	16.8	16.9	0.74	0.56	4.79	3.51
Oct	15.1	15.7	14.0	14.6	16.3	16.6	0.61	0.44	4.05	2.80
Nov	14.9	15.6	13.7	14.4	16.0	16.2	0.55	0.41	3.68	2.61
Dic	14.8	15.7	13.3	14.5	17.2	17.3	0.80	0.64	5.38	4.09

TT = Tomalón-Tabacundo; LT = La Tola; D.E.= Desviación estándar; C.V.= Coeficiente de variación.

Los datos de precipitación media anual según la desviación estándar y el coeficiente de variación presentaron una alta variabilidad y baja homogeneidad debido a datos no próximos a la media en las dos estaciones (Tabla 10), por problemas de la estación, cambios de emplazamiento y a su vez por cambios de observador o del medio (Saladié et al, 2005).

Tabla 10. Resumen de la estadística descriptiva de precipitación de las estaciones del período (1990-2020)

	TT	LT	TT	LT	TT	LT	TT	LT	TT	LT
	Med	Med	Min	Min	Max	Max	D.E.	D.E.	C.V.	C.V.
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(%)	(%)
Ene	57.5	69.4	18.8	4.9	116.5	203.8	28.7	41.5	49.8	59.8
Feb	55.8	79.8	6.1	4.2	116.9	159.8	29.5	45.1	52.9	56.6
Mar	76.5	125.4	16.3	12.1	165.2	230.7	36.2	48.8	47.3	39.0
Abr	87.6	113.4	37.7	16.1	198.2	263.8	35.8	58.6	40.9	51.6

May	59.9	68.8	6.7	15	167.1	144.7	35.8	38.6	59.8	56.1
Jun	26.6	26.9	1.5	0.3	71.7	98.9	18.9	22.2	71.0	82.7
Jul	13.6	13.6	0.0	0.6	63.1	69.6	15.6	15.6	114.8	115.0
Ago	9.9	15.9	0.0	0	41.8	58.4	11.1	16.3	112.4	102.0
Sep	30.2	46.5	4.6	7.8	99.4	96.5	22.6	27.6	75.0	59.4
Oct	67.4	103.7	14.2	34.6	134.7	221.2	30.7	40.2	45.6	38.8
Nov	68.0	106.5	18.0	17.6	153.1	235.9	36.8	59.9	54.2	56.3
Dic	60.4	76.6	1.0	2.5	169.1	166.4	36.4	41.6	60.3	54.3

TT = Tomalón-Tabacundo; LT = La Tola; D.E.= Desviación estándar; C.V.= Coeficiente de variación.

Para el periodo de 30 años (1990-2020) en la estación Tomalón Tabacundo se registró un promedio histórico de temperatura de 15°C y precipitación 51.11 mm, siendo el rango de variación para temperatura entre 14.1°C y 15.9°C mientras que para precipitación de 34.1 mm y 70.5 mm. Desde 1990 la temperatura varió con el pasar de los años entre subidas y bajadas, sin embargo, desde 2012 tuvo constante ascenso. Caso contrario de la precipitación la cual mostro valores por debajo de la media desde el 2014 hasta el 2019 (Figura 12). Concluyendo que el aumento de la temperatura sea inversamente proporcional a la precipitación.

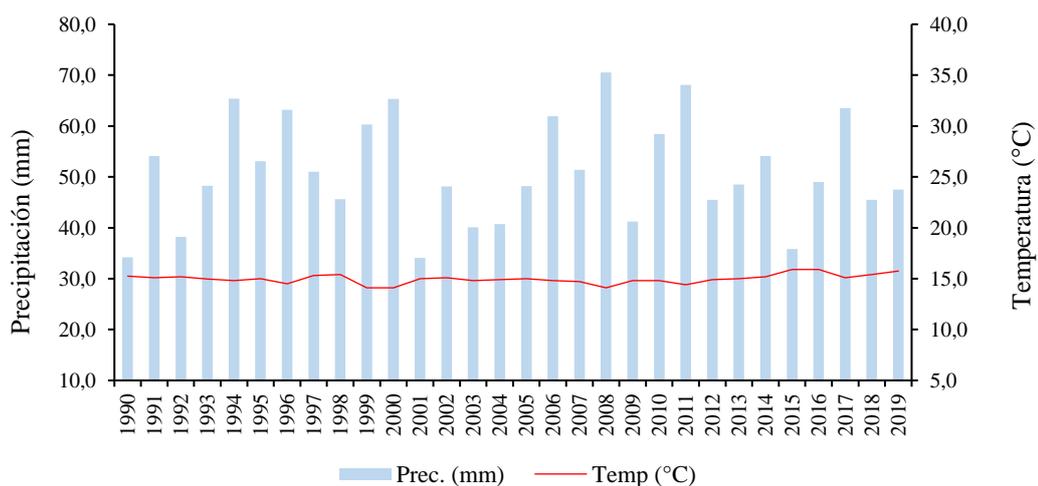


Figura 12. Diagrama ombrotérmico anual de la estación Tomalón-Tabacundo

La estación “La Tola” por su parte manifestó cierta similitud con respecto a la estación “Tomalón Tabacundo” antes descrita, donde registró un promedio histórico de temperatura de 15.7°C y precipitación 70.5 mm, siendo el rango de variación para temperatura entre 14.7°C y 16.5°C mientras que para precipitación de 46.1 mm y 98.3 mm. En este caso, la temperatura desde 2012 solo se incrementó hasta 2019. La precipitación por su parte mostró valores que ascienden y descienden siendo los años 2012 al 2016, valores por debajo de la media igual a la temperatura como lo indica la figura 13.

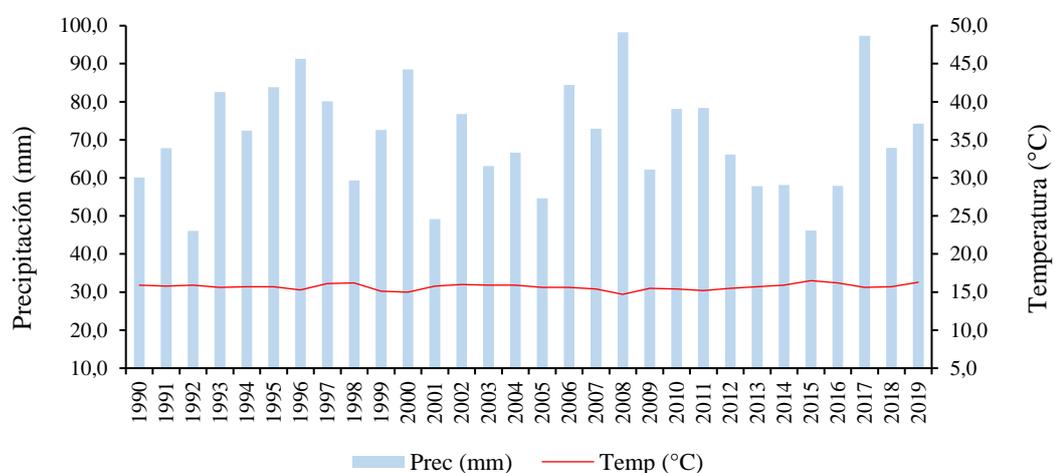


Figura 13. Diagrama ombrotérmico anual de la estación La Tola

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). 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.

Según Chamba y Chuncho (2017) muestran anomalías de precipitación y temperatura desde el año 2004 hasta el 2016 en la cuenca del río Jubones en la

provincia de Loja, considerando períodos con meses muy secos en comparación al 1990 con una reducción de casi el 6.1% de precipitaciones para el año 2016. La diferencia de precipitaciones se provee por la influencia de las corrientes cálida del niño que avanza en las costas del pacífico de norte a sur y la corriente fría del Humboldt que avanza desde el hemisferio sur y la influencia de este fenómeno cubre la mayor parte del territorio de Loja. Por lo que, en el presente estudio presentó similares variaciones en la precipitación desde el año 2012 hasta el 2019 en las dos estaciones.

4.2.1.1. Análisis climático mensual

La época ecológicamente lluviosa fue bimodal en los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre, siendo abril el mes con mayor precipitación 87.6 mm y una temperatura de 14.8°C. Mientras que la época ecológicamente seca perteneció a los meses de junio a septiembre, siendo agosto el mes más seco con precipitación de 9.9 mm en 15.5°C (Figura 14). Estos valores se corroboran con el diagrama ombrotérmico realizado en base a los datos de la estación Tomalón Tabacundo correspondiente al periodo 1990-2020.

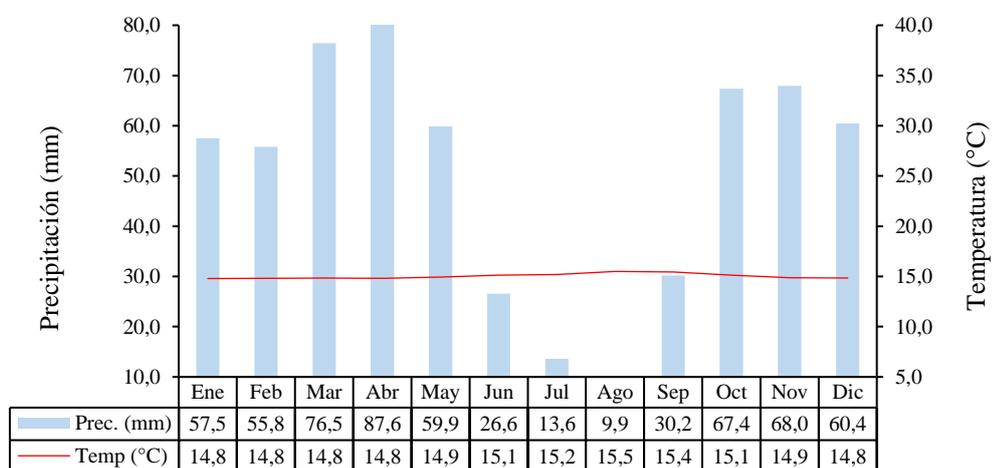


Figura 14. Diagrama ombrotérmico de la estación Tomalón-Tabacundo

La estación la Tola, determinó los meses secos de junio a septiembre, con un promedio de temperatura de 15.8°C, el mes más seco y con menor precipitación fue julio con 13.6 mm. Mientras que los meses restantes corresponden a la época

lluviosa sobre todo el mes de marzo que presentó precipitaciones 125.4 mm (Figura 15).

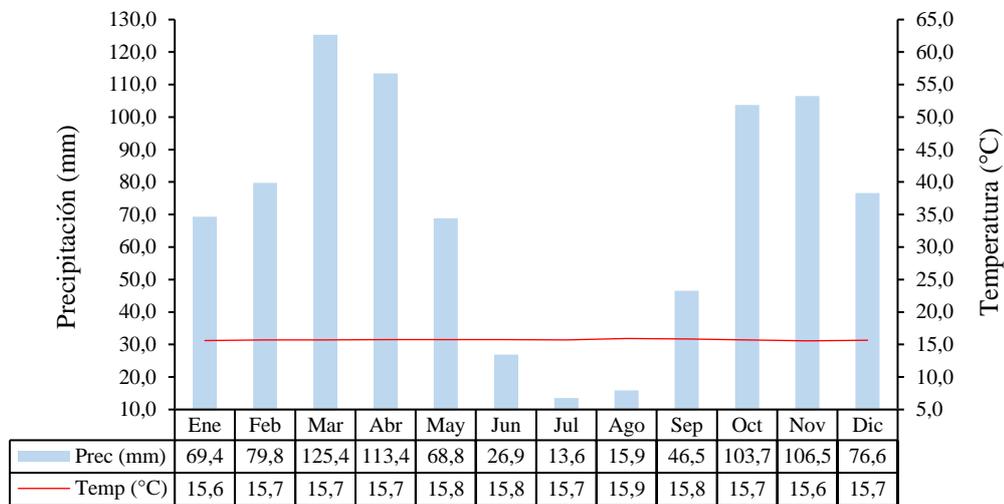


Figura 15. Diagrama ombrotérmico de la estación La Tola

El nevado Cayambe al encontrarse en la cuenca del río Blanco posee una topografía que lo ubica entre dos fuentes de humedad que son la Amazonía y la Cordillera de los Andes razón por la cual presenta época lluviosa bimodal la primera constituyéndose entre marzo y abril y la segunda entre octubre a diciembre (Valencia, 2014). En Colombia la convergencia intertropical marca dos temporadas lluviosas por año en mayor parte del territorio que son de abril-mayo y septiembre-noviembre, caso contrario de las temporadas con menor precipitación que son de diciembre-febrero y julio-agosto las cuales se deben en gran parte a la distribución espacial que está marcada por la humedad en el Caribe, Pacífico y Amazonía por los vientos predominantes y la topografía (Poveda, 2004; Hurtado y Mesa, 2014).

Según Gil y López (2011) describen que en los últimos veinticinco años se ha producido una depreciación de precipitaciones en los meses de junio y julio, y también de agosto en las zonas de Cehegín, Bullas y Barranda; época en la que se presentan altas temperaturas que muestran estabilidad o aumento respecto a los valores medios, enfatizando que este aumento es mayor en los meses medios del año, periodo en el que se produce una mayor pérdida de precipitaciones. En

Cehegín, los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, posee una temperatura de 0.3°C superior en los últimos veinticinco años.

4.2.2. Tendencia de variabilidad climática

Los resultados de la prueba de normalidad de los datos de temperatura de la estación Tomalón Tabacundo realizado mediante el estadístico Shapiro Wilks tuvo un $p\text{-value} = 0.55$ 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 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 (Tabla 11). Armenta, Villa y Jácome (2016) afirman en sus investigaciones que la temperatura en la Sierra no muestra incrementos significativos, sin embargo, Serrano et al. (2012) reportaron que la temperatura en la ciudad de Quito se ha incrementado en 0.12°C por década. Rojas et al. (2010) reportan tendencias crecientes en temperatura, ya sean en meses de época seca o meses de época lluviosa en zonas altas andinas de Cundinamarca y Boyacá del país Colombia datos que semejantes a la estación Tomalón-Tabacundo.

Con respecto a la estación la Tola tuvo un resultado de normalidad de los datos $p\text{-value} = 0.25$ representando una distribución normal. Para la prueba de Mann Kendall estadísticamente no existió tendencias significativas, sin embargo, los meses con valores Z positivos indicaron la posibilidad de que la temperatura media mensual continúe en aumento, aunque se encontraron mayor número de meses con tendencias decrecientes (Tabla 11). Estos resultados fueron analizados a nivel mensual en dos estaciones, por lo tanto, no se puede correlacionar con los datos de incremento de temperatura a nivel mundial de 0.084 y $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ (Valdez et al., 2003).

Los resultados presentados de la estación La Tola son semejantes con otras investigaciones realizadas a nivel regional y local. Inzunza et al. (2011) determinan

que en México en la 'Comarca Lagunera' y cercanías obtuvieron una tendencia decreciente de temperatura debido a la época de abundantes lluvias.

Serrano et al. (2012) determinan 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 podían tener relación con estas fluctuaciones de tendencias positivas y negativas de temperatura.

Tabla 11. *Tendencias de temperatura mensuales de las estaciones*

Meses	Test Z Tomalón- Tabacundo	Nivel de significancia	Test Z La Tola	Nivel de significancia
Enero	0.16	-	-0.20	-
Febrero	0.47	-	0.27	-
Marzo	1.00	-	0.40	-
Abril	0.93	-	-0.16	-
Mayo	0.32	-	-0.16	-
Junio	0.25	-	-0.39	-
Julio	1.19	-	1.02	-
Agosto	1.16	-	0.64	-
Septiembre	2.05	*	0.56	-
Octubre	0.84	-	-0.14	-
Noviembre	2.33	*	1.15	-
Diciembre	0.09	-	0.02	-

(*) = significativo; (-) = no significativo

Los datos de la precipitación para las dos estaciones no presentaron normalidad de los datos por un $p\text{-value} = 0.0001$ y con el estadístico Mann Kendall no obtuvo significancia estadística demostrando que la precipitación es errática y no presenta tendencias significativas. A pesar de que en las dos estaciones se obtuvo un número mayor de valores con tendencias decrecientes (Tabla 12). Según Bendix

y Lauer (1992) en el Ecuador la determinación solar de los regímenes anuales de precipitación se ve influenciada por la cordillera Andina y por las corrientes oceánicas de Humboldt y El Niño, así como por los vientos de valle. Tapiador et al. (2011) indica 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, hace que los patrones sean más fluctuantes en espacio y tiempo como ocurre en la cordillera de los Andes. Dicho comportamiento diverso de precipitación se evidencia dentro del Distrito Metropolitano de Quito, donde existen cambios inclusive en su estacionalidad (Serrano et al., 2012).

Tabla 12. *Tendencias de precipitación mensuales de las estaciones*

Meses	Test Z Tomalón- Tabacundo	Nivel de significancia	Test Z La Tola	Nivel de significancia
Enero	0.70	-	-0.39	-
Febrero	0.27	-	1.02	-
Marzo	-0.73	-	0.32	-
Abril	0.89	-	0.54	-
Mayo	0.07	-	-0.50	-
Junio	0.25	-	-0.32	-
Julio	-0.61	-	-0.91	-
Agosto	0.27	-	-0.61	-
Septiembre	-0.87	-	-1.28	-
Octubre	1.25	-	0.07	-
Noviembre	-0.18	-	-1.00	-
Diciembre	0.00	-	-0.12	-

(*) = significativo; (-) = no significativo

4.2.3. Relación entre tendencias de variabilidad climática y retroceso glaciar

Para el período de estudio (30 años) se utilizó los datos de la superficie glaciar de los diferentes años: 1991, 1999, 2002, 2009, 2016 y 2017 correspondientes a los tres períodos de estudio de los resultados generados en el objetivo uno; y los valores significativos de las variables climáticas anuales de la estación Tomalón-Tabacundo debido a la cercanía a la zona de estudio y la viabilidad de los datos climáticos.

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 glaciaria mostró una correlación leve con un valor de $r = -0.27$. Con respecto a la tendencia de la precipitación acumulada anual disminuye en la zona de estudio con un valor no significativo $Z = -0.43$. Dicha variable con la superficie glaciaria 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 glaciaria y las variables climáticas.

La correlación de Pearson permitió confirmar que existe un nivel de asociación entre el retroceso de la superficie glaciaria y la variabilidad de la temperatura y precipitación. Es decir, la superficie glaciaria 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 glaciario a razón de -0.43 mm (Tabla 13) para los 30 años de estudio.

Tabla 13. *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	2.2	-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 (Figura 16). 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.

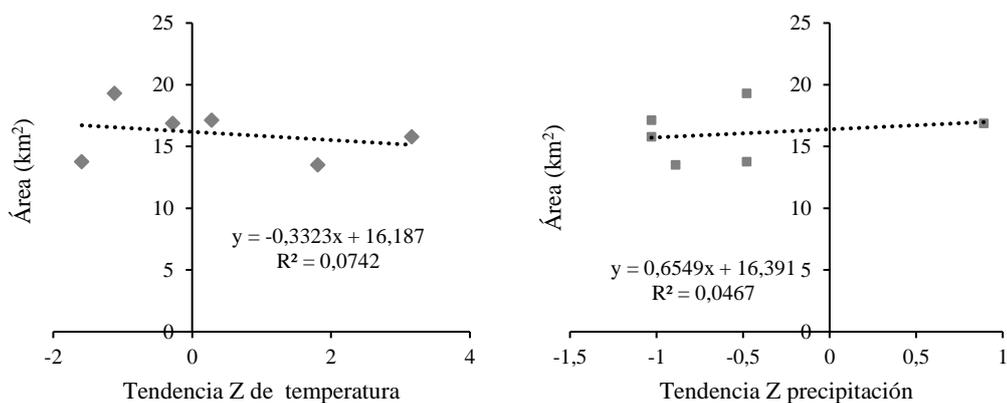


Figura 16. Regresión cuadrática de las variables climáticas de la estación Tomalón Tabacundo

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

°C a 0.4 °C por década para la temperatura media y de 0 a 250 mm/década en las precipitaciones medias anuales y por ende la tendencia en aumento de temperatura es evidente en las cuencas hidrográficas, aunque a nivel estadístico se registra tendencia positiva que es ampliamente influenciado 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, sin embargo, estas cuencas se encuentran influenciadas por los patrones climáticos diferentes con dos temporadas de lluvias y dos temporadas de lluvias a menor escala que predomina en casi toda la extensión de las cuencas, por lo que, los eventos de La Niña y el Niño no parecen relacionarse de manera directa con los cambios de variabilidad en el clima, pero esta variabilidad puede producir grandes afectaciones como en el 2010-2011 una ola invernal provocando deslizamientos e inundaciones generando grandes pérdidas en esta región (Alzate et al., 2015).

Según Giaccone et al. (2015) reportan que el glaciar Sabbione norte perteneciente a los Alpes de Italia sufrió una reducción de glaciar de -90 m. entre el período de 1978-2005 por las altas temperaturas, comprobado mediante la correlación máxima de -0.628 entre las variaciones del glaciar y la temperatura máxima. Además, Colonia y Torres (2012), mencionan en su investigación 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). Existen varios análisis sobre el efecto de las islas de calor con respecto a las tendencias de temperatura. Tal es el caso del aumento de tendencias de temperaturas máximas y mínimas en el período de 1963-2006 de la estación de Izobamba del Distrito Metropolitano de Quito con valores de $0.0186^{\circ}\text{C/año}$ y $0.0114^{\circ}\text{C/año}$,

respectivamente, considerando la zona de estudio como isla de calor debido al uso de suelo y la alta demanda de urbanización (Serrano et al. 2012).

Impactos como la deforestación acarrear consecuencias, las cuales deben considerarse. Por ejemplo, Salazar (2011) mediante un modelo matemático estima que un cambio drástico en la cobertura en la Amazonía conduciría a la disminución de precipitaciones en Colombia a razón de 300 mm/año y un aumento de temperatura en los Andes colombianos que llevaron a la desaparición de ocho glaciares tropicales y la pérdida desmesurada de hielo de seis nevados.

Además, Rojas et al. (2010) concluye que el aumento de temperatura y disminución de precipitación produce daños fisiológicos, muerte celular y destrucción de tejidos en los ecosistemas vegetales, provocando daños irreparables y pérdidas parciales o totales de vegetación.

4.3. Proyección futura del retroceso glaciar

Por medio de las áreas estimadas en el período de estudio (1991-2017) se realizó un escenario futuro mediante el modelo matemático de interpolación aritmética para los años 2030, 2040 y 2050, tomando en cuenta que el nevado Cayambe tiene tendencias decrecientes de deglaciación por la variabilidad climática como temperatura y precipitación. Esto permitió estimar la superficie retrocedida del glaciar a 13, 23 y 33 años a partir del año 2017.

La superficie glaciar del nevado Cayambe para el año 2030 será de 10.6 km², por consiguiente, se reducirá un 45.1%, para el 2040 la superficie será de 8.4 km² con un porcentaje de reducción del 56.5% y para el 2050 la superficie será de 6.1 km² con una reducción del 68.4% tomando como referencia el año inicial 1991 para todos los escenarios (Tabla 14). 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 14. *Escenario futuro de la superficie glaciar del nevado Cayambe*

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

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) donde 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.

Según 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 km² con una reducción del 35% con referencia al año 1987. De igual manera Schauwecker, Kronenber y Cruz (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, y mediante el escenario RCP 2.6 que estima que la altura de congelación aumentará en 230 m donde el hielo se derretirá a partir de los 0°C y bajo el escenario más pesimista que es el RCP 8.5 el aumento será tres veces mayor estimando un aumento de 850 m donde se preservarán las áreas glaciares que estarán por encima de una nueva altura de congelación, teniendo únicamente el 15% del área glaciar en esta zona por lo cual pequeños glaciares de elevaciones bajas se encuentran en desequilibrio climático y desaparecerán durante las próximas décadas.

4.3.1. Tendencia del retroceso glaciar del nevado Cayambe

La regresión cuadrática expuso un valor de $R^2 = 0.9857$ (Figura 17) demostrando que el grado de tendencia, y demuestra que hubo un 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 y al mostrar una pendiente negativa significa que presenta una tendencia decreciente del área glaciar con el tiempo sobre todo desde el año 1999 que representa una tendencia decreciente acelerada hasta el año 2017.

Con la implementación de la fórmula obtenida en la regresión cuadrática se obtuvo los valores de las áreas que van disminuyendo en los años venideros representando similitud a las áreas obtenidas aplicando la fórmula de la proyección futura (V), por lo que se estima que el glaciar del nevado Cayambe desaparecerá para el año 2080.

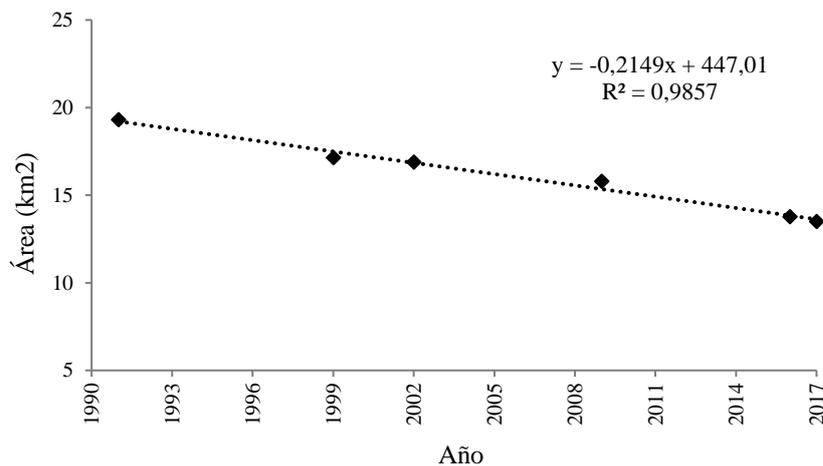


Figura 17. Resultado de la regresión cuadrática del área en función del tiempo

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 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.

4.3.2. Cartografía temática de la proyección futura

Se obtuvo como instrumento de soporte un mapa (Figura 18) 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.

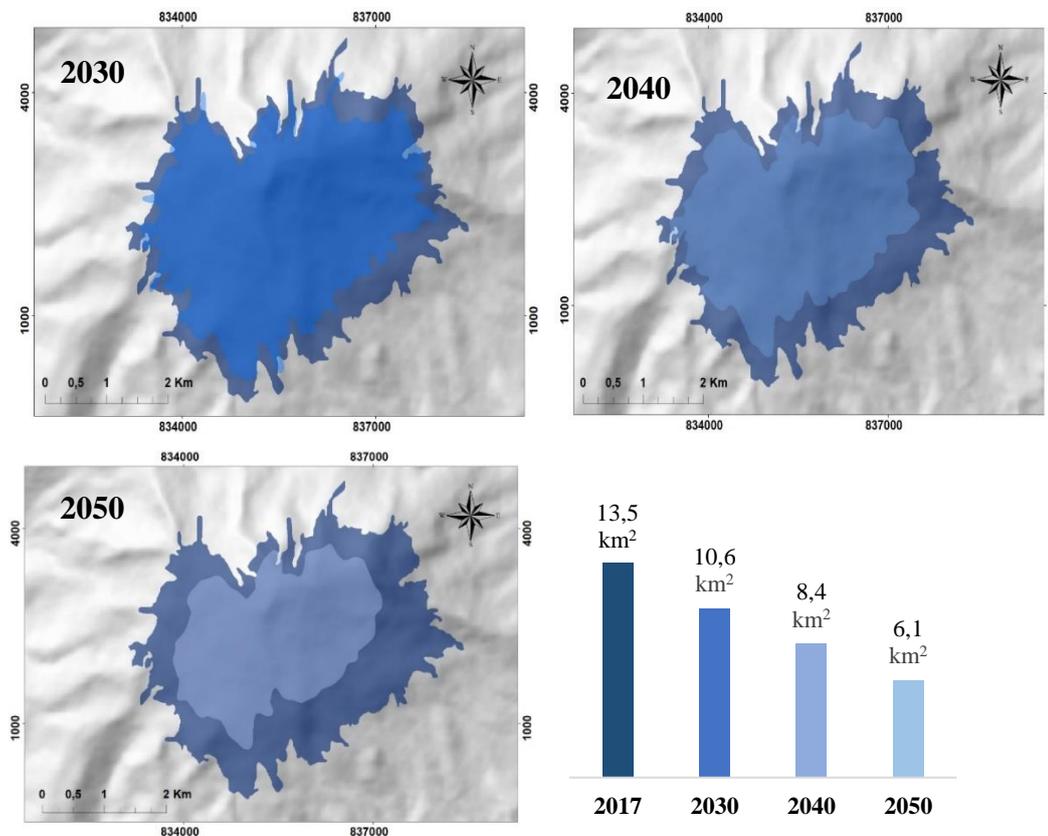


Figura 18. Retroceso del nevado glaciar en los años 2030, 2040 y 2050

Según Pellitero (2014) menciona que la estimación de la evolución altitudinal de la línea de equilibrio del glaciar Artesonraju de Perú, en base a los datos obtenidos por la medición de balance de masa y una evaluación no lo suficientemente rigurosa ya que se trabajó con datos de los años 2004-2014, la línea de equilibrio altitudinal del glaciar ascendería desde los 4930 msnm que tuvo en el año 2000 hasta los 5130 msnm en el año 2100. Esta ascensión de aproximadamente 200 metros en conjunto con el retroceso glaciar que será constante.

El escenario futuro de la deglaciación de la Cordillera Blanca muestra que llegará tres veces mayor al período de estudio (1962-2014) según tres escenarios analizados la Cordillera Blanca para el año 2064 obtendrá un área de 12.00 km² hasta 2.12 km² una reducción que representa más de la mitad del área actual que es de 15.29 km² y el aumento de la línea de equilibrio altitudinal llegará a las cotas máximas lo que afectará al glaciar incluso provocando su desaparición, por lo que se concluye que los glaciares que se encuentran dentro de esta cordillera perderían su cobertura nival en un 90% (Cuadros, 2018).

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Mediante el coeficiente de correlación ($r = -0.993$) se determinó que existe un retroceso glaciario con el pasar de los años, esto se evidenció debido a que en el año 1991 se obtuvo un área de 19.31 km^2 , mientras que para el año 1999 se redujo el área a un valor de 17.14 km^2 esto dentro del primer período (1990 – 2000), dicha tendencia de decrecimiento del glaciar se manifestó para los años subsiguientes, 2002 con un área glaciario de 16.88 km^2 y 2009 un área de 15.78 km^2 , correspondientes al segundo período (2000 – 2010). En el tercer y último período se determinó que la tendencia continúa en aumento acelerado debido a que el área glaciario para el año 2016 es de 13.76 km^2 y para el año 2017 es de 13.5 km^2 .

En el período de 30 años (1990 – 2020) se estimó un porcentaje de reducción del glaciar en el nevado Cayambe de alrededor de 30.09%, con una tasa de cambio anual de -1.19%. El subperíodo con mayor tasa de pérdida de glaciar fue desde el 2010 al 2017 con un valor de tasa anual de -1.93%, evidenciando que los glaciares en los días venideros están próximos a perder gran parte de su cobertura glaciario.

Las estaciones Tomalón Tabacundo y la Tola demostraron valores crecientes de temperatura y decrecientes de precipitación con respecto a la media, desde el año 2012 hasta el 2019, datos que concuerdan con varias investigaciones regionales donde muestran un incremento de una décima de temperatura en toda América Latina.

El análisis climático mensual determina que en las dos estaciones existen épocas ecológicamente lluviosas bimodal siendo marzo y abril los meses con más lluvia con valores de precipitación de alrededor de 125.4 mm y 87.6 mm, respectivamente, y julio y agosto los meses más secos con valores de precipitación de 13.6 mm y 9.9 mm, respectivamente, para la zona de estudio.

En el análisis mensual de las tendencias climáticas la estación Tomalón Tabacundo presentó valores crecientes significativos en los meses septiembre ($Z = 2.05$) y noviembre ($Z = 2.33$), en los meses restantes se obtuvieron valores crecientes, pero no significativas, datos similares a los analizados en la estación La Tola al obtener en la mayor parte de los meses datos positivos demuestra la posibilidad que la temperatura media mensual continúe en aumento con el pasar del tiempo; sin embargo, en la estación La Tola se encontraron cinco meses con tendencia decreciente de temperatura. En cuanto a la precipitación las dos estaciones no presentaron tendencias significativas, pero al ser valores negativos tienden a decrecer.

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 (r) 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 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 aplicación de la ecuación de la proyección futura estima 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^2 , para el año 2040 tendrá un área glaciar de 8.4 km^2 y para el año 2050 el nevado Cayambe tendrá un área de 6.1 km^2 , 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 -0.993 de retroceso glaciar

y según el polinomio cuadrático para el año 2080 el glaciar desaparecerá en su totalidad.

5.2. Recomendaciones

Mediante la investigación realizada se determinó que el área glaciar tiende a decrecer conforme avanza los años, por lo cual para complementar dicha investigación se recomienda 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.

Es necesario apoyar este tipo de investigaciones a nivel local y nacional para conocer de forma puntual, a largo plazo y con los recursos necesarios los efectos que ocasiona el cambio climático y como afectan a los glaciares al ser una fuente principal del recurso hídrico para las poblaciones aledañas a los glaciares ya que el agua proveniente de glaciares se utiliza para riego, uso doméstico y consumo humano.

Los datos meteorológicos de este trabajo de investigación fueron recolectados hasta el año 2019, por ello, es recomendable realizar este tipo de estudios cada cierto tiempo con datos actualizados para conocer el estado de los glaciares del Ecuador a causa de la variabilidad climática añadiendo estrategias encaminadas al desarrollo sostenible para evitar una tendencia creciente de temperatura y una tendencia decreciente de precipitación.

Mejorar el modelo matemático de la predicción futura donde 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.

Difundir los resultados de las proyecciones futuras a distintos profesionales y entidades gubernamentales para su respectivo análisis en cuanto a la relación con el retroceso glaciar y la falta de agua en las zonas circundantes del Nevado Cayambe para que a futuro el acceso al agua no sea limitada.

Referencias

- Aguilar, H., Mora, R., y Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, (53) 39-59. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aguilón, V., Barrales, R., Méndez, G. (2011). *Ambientes Glaciares*. UNAM. <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/A1-Glaciares.pdf>
- Aldo, M. (2015). *Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico*. Instituto Geofísico Del Perú -IGP, 2, 1-6. http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/Divulgacion_PPR_El_Nino_IGP_201501.pdf
- Alencar da Silva, K. y Nóbrega, R. (2016). 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 postgrado, Universidad de Salzburg]. http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/49982/1/TESIS_FINAL_SALINAS_SOLIS.pdf
- Alva, M. y Meléndez, J. (2005). 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. & 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://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=1>

Ariza, A. (2006). Análisis del Retroceso del Glaciares Tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. *Revista Politechne*. (Vol 13 N°1).

https://www.researchgate.net/publication/313345265_Analisis_del_Retroceso_de_Glaciares_Tropicales_en_los_Andes_Centrales_de_Colombia_Mediante_Imagenes_Landsat

Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático.

<https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPC%20C-AR5.pdf>

Ascásubi, JJ. (1802). Letter to Baron von Humbolt. In: “von Humbolt A, Briefe aus Amerika, 1799-1804” herausgegeben von Ulrike Moheit, Akademik Verlag. 1993, pp 174-176.

Balakrishnan, N.; Peña, E. y Silvapulle, M. (2008). Pranab Kumar Sen: Life and works. IMS Collections. Institute of mathematical statistics. Vol 1, 1-16. DOI: 10.1214/193940307000000013

Barros, V. (2005). El cambio climático y la Costa Argentina del Río de la Plata. https://www.fundacionciudad.org.ar/pdf/CCLimatico_RdP.pdf

Bautista, W. y Carrera 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

Benavides, H., y León, G. (2017). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. IDEAM-METEO, 1,05-10.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befec11cf15f06dd>

Bendix, J., & Lauer, W. (1992). Die Niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation (Rainy Seasons in Ecuador and Their ClimateDynamic Interpretation). *Erdkunde*, 118-134.
<http://doi.org/10.3112/erdkunde.1992.02.04>

Bermex, N. y Tejada, M. (2010). Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. AEDES.

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.

Bolch, T. (2006). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. Elsevier, *ScienceDirect*. *Global and Planetary Change* 56, 1–12.
[doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009)

Brito, C. (2014). Análisis espacial y temporal de la variación de cobertura nivoglaciar 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. (2003). Estudio de la evolución del glaciar 15 del Antisana de 1956 al 2001 utilizando fotogrametría y topografía y su relación con los eventos climáticos regionales. Revista Politécnica, Monografía de recursos minerales 2, Volumen 24, Número 2. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-03/010045458.pdf
- Cáceres, B. (2010). Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador. [Master Thesis. Univ. Nice, France], pp 84. <https://core.ac.uk/download/pdf/39836084.pdf>
- Campbell, J. (1987). Introduction to Remote Sensing. Fifth edition. The Gilford Press. Vol. 1. ISBN 978-1-60918-176-5.
- Carrera, D.; Guevara, P.; Tamayo, L.; Balarezo, A.; Narváez, C. y Morocho, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de precipitación media. IDESIA. Volumen 34, N°3. p. 81-90
- Castillo, I. y Rodríguez, M. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. MUTIS. Vol. 7 (1) pp. 20-33. doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1183>
- 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.
- Choi, H., y Bindschadler, R. (2004). Cloud detection in Landsat of ice sheets using shadow matching technique and automatic normalized difference snow index threshold value decision. Remote Sensing of Environment, 91, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.007>
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Primera edición. Editorial RIALP, S.A.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Segunda edición. Ediciones RIALP, S.A. ISBN: 8432126802

- Código Orgánico Ambiental, (2018). Registro oficial suplemento 983. (21 de agosto del 2018).
- 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
- 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>
- Comisión colombiana del espacio CCE, (2007). Clasificación de sensores remotos y tecnologías para observación de la Tierra. Proyecto satelital colombiano de observación de la Tierra. <http://pdfhumanidades.com/sites/default/files/apuntes/CLASIFICACION%20SENSORES%20REMOTOS%20COLOMBIA.pdf>
- Condori, I.; Loza, M.; Mamani, P. y Solíz, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. J. Selva Andina Res. Soc.; 9(1):25-44.
- 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. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3835/cuadros-diaz-sandra-flor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. Revista de Ingeniería, 26, 74-80.
- 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 LAMOLINA: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM>
- Denis, D., y Alonso., M. (2010). Cronología de la Reproducción de las aves acuáticas y su relación con las condiciones climáticas en la ciénaga de Birama, Cuba, entre 1995 y 2004. *Mesoamericana*, 14 (1), 35-43.
- Detienne, M., Delmelle, P., Guevara, A., Samaniego, P., Opfergelt, S., & Mothes, P. A. (2017). Contrasting origin of two clay-rich debris flows at Cayambe Volcanic Complex, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 79(4). DOI:10.1007/s00445-017-1111-2
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9–22. DOI:10.1016/0034-4257(89)90101-6
- Evans, S. G., y Clague, J. J. (1994). Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*, 10(1-4), 107–128. DOI:10.1016/0169-555x(94)90011-6
- 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>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). Diagnostico Nacional de Montañas República del Ecuador. http://www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/TCP_Andes/Diagn%C3%B3stico_de_Mont%C3%B1as_del_Ecuador_final.pdf
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2014). Cordillera de Los Andes, una oportunidad para la integración y desarrollo de América del Sur. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/mountain_partnership/docs/ANDES%20TCP%20publication%20corregido%20arg2.pdf
- 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://www.iucn.org/sites/dev/files/spanish_carbonoazul_lr.pdf

Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J.E., Silvestre, E.E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J.L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune, Y., Ramallo, C., y Mendoza, J. (2014). Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático.
https://www.researchgate.net/publication/259759577_GLACIARES_DE_LOS_ANDES_TROPICALES_VICTIMAS_DEL_CAMBIO_CLIMATICO_CAN_PRAA_IRD

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. DOI: 10.1579/0044-7447-29.7.416

Francou, B.; Cáceres, B.; Villacís, M.; Basantes, R.; Maisincho, L.; Galárraga, R.; 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_last_decades

Fundación Antisana (1998). Plan de Manejo de la Reserva Ecológica Cayambe – Coca. Instituto Nacional Forestal de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Proyecto Subir II.

GADIP del Municipio del Cantón Cayambe (2018). Plan Estratégico de Desarrollo Turístico Sostenible e Innovación del Cantón Cayambe 2017-2022.

<https://cayambeturismo.gob.ec/wp-content/uploads/2019/PlanEstrat%C3%A9gico2018.pdf>

Galárraga, G. (2018). Análisis de la amenaza sísmica y volcánica para la presa de la laguna San Marcos: Cayambe – Pichincha. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio UCE.

Gallegos Castro, E., Brito Chasiluisa, C. Serrano Giné, D., 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)*, n° 22, p. 97-113. ISSN: 1578-5157. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.577>

García, J., Gómez, A., Ortigosa, L. y Martí, C. (1999). Los circos glaciares en los altos valles del Aragón y del Gallego (Pirineo Central Español). Análisis morfométrico y variaciones espaciales. *Cuaternario y Geomorfología* 13 (1-2), pág. 95 – 108. ISSN: 0214-1744 [http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol13_1/Cuaternario13\(1-2\)_10.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol13_1/Cuaternario13(1-2)_10.pdf)

García, M., Évora J., y Pérez M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias, 1, 10-20. http://www.gmrcanarias.com/wp-content/uploads/2016/01/20_catalogo_satelites_es.pdf

Giaccone, E.; Colombo, N.; Acquotta, F.; Paro, L. y Fratianni, S. (2015). Climate variations in a high-altitude Alpine basin and their effects on a glacial environment (Italian Western Alps). *Atmósfera* 28(2), 117-128.

Gil, S. y López, F. (2011). Tendencia de las precipitaciones y temperatura en una pequeña cuenca fluvial del sureste Peninsular Semiárido. *Boletín de Asociación de Geógrafos Españoles* N° 56, págs. 349-371. ISSN: 0212-9426.

Gil, J.M. (2012). Retroceso glaciar y cambio climático en los Andes Peruanos: principales impactos.

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:jo9H73sQzycJ:cdn.biodiversidadla.org>

Gómez, C. y Calderón, D. (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). [Tesis de pregrado, Universidad de Granada]. Repositorio Granada: <https://core.ac.uk/download/pdf/143448066.pdf>

González, F., Ruiz, J., y Acosta, F. (2014). Tutorial de Teledetección Espacial. Unión Europea. TELECAN. https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/ES_TUTORIAL_COMPLETO.pdf

Gutiérrez Elorza, M. (2008). Geomorfología, Pearson/Prentice Hall, Madrid, 898 p., ISBN 97884832-23895. Investigaciones Geográficas, (71). <https://doi.org/10.14350/rig.59485>

Hall, D., Riggs, A., y Salomonson, V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing Environment*, 54, 127-140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)

Hastenrath, S., y Ames, A. (1995). Recession of Yanamarey Glacier in Cordillera Blanca, Peru, during the 20th century. *Journal of Glaciology*, 41(137), 191–196. doi:10.3189/s0022143000017883

Hernández, J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de farmacología y terapéutica*. Volumen 37, numero 5.

Herrera, S., Bautista, R. y Valdez, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia*. 26 (1), 65-80.

Horning, N., Robinson, J., Sterling, E., Turner, W., and Spector, S. (2010). *Remote Sensing for Ecology and Conservation A Handbook of Techniques*. OXFORD University Press. ISBN: 978-0-19-921995-7

- Hurtado, A. y Mesa, O. (2014). Reconstrucción de los campos de precipitación mensual en Colombia. *DYNA*, 81(186), pp. 251-258. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/49574>.
- 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.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2014). Ecuador en Cifras. Recuperado el 04 de agosto de 2020, de Encuesta de condiciones de vida: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Encuestas_Ambientales/Hogares_2014/Principales_Resultados_Ambientales_Hogares_2014.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Climate Change. (2007). Summary for policymakers. IPCC Working Group I Fourth Assessment Report. IPCC. 1-18
- Inzunza, J., Bernardo, L., Valdez, R., Mendoza, B., Sánchez, I., & 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
- Jácome, G., Valarezo, C. & Yoo, C. (2018). Assessment of water quality monitoring for the optimal sensor placement in lake Yahuarcocha using pattern recognition techniques and geographical information systems. *Environ Monit Assess* 190, 259. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6639-x>
- 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. Universidad Técnica del Norte y Empresa pública Yachay E.P.

- Jara, P. (2012). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Cuenca <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf>.
- Jiménez, M. y Farias, P. (2005). Geomorfología glacial en la Cordillera Cantábrica (noroeste de España): algunos ejemplos. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra. (13-3). Pp 259 – 269. https://www.researchgate.net/publication/28252276_Geomorfologia_glaciar_en_la_Cordillera_Cantabrica_noroeste_de_Espana_algunos_ejemplos
- Jordan, E.; Ungerechts, L.; Caceres, B.; Penafiel, A.; Francou, B. (2005). Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. Hydrological Sciences Journal, 50, pp. 949–961. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.949>
- Kaser, G., Hastenrath, S., y Ames, A. (1996). Mass balance profiles on tropical glaciers Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie. ELSEVIER. 32,75-81. <https://doi.org/10.1006/qres.2000.2142>
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. Global and Planetary Change, 22 (1-4), 93-103. DOI: 10.1016/S0921-8181(99)00028-4
- Kirby, E. (2012). Cálculo del número de puntos GPS para la corrección geométrica y generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y mediana pendiente. [Tesis de postgrado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio USFQ: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1818><http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2177>
- Kundzewicz, Z. y Robson, A. (2000). Setting the scene. In: Detecting trend and other changes in hydrological data. (Eds. Kundzewicz, Z. W. and Robson, A.). World Meteorological Organization. World Climate Programme – Water. WCDMP-45. WMO/TD-No. 1013: 1-5.
- Maldonado, E. (2015). Propuesta de educación ambiental y turística para visitantes del embalse la Mica, provincia del Napo. [Tesis de pregrado, Universidad

Central del Ecuador]. Repositorio UCE:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4525/1/T-UCE-0004-006.pdf>

Manciati, C.; Cadier, E.; Galárraga, R. y Taupin, D. (2011). Retroceso de glaciares tropicales en América del Sur y evolución de la temperatura en los Andes del Ecuador. Caso nevado Antisana. Revista peruana geo-atmosférica RPGA (3), 38-50.

Messerli, B., 2001. The international Year of Mountains (IYM), the mountain research initiative (MRI) and PAGES. Editorial, Pages News, 9(3): 2. DOI: <https://doi.org/10.22498/pages.9.3.2>

Mieza, S., Kovac, F., y Martínez, D. (2012). Imágenes satelitales y áreas en aplicaciones sitio específicas. En A. Carró y E. Ghironi, Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana (pp.10-14).

Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). Metodología para clasificación de coberturas a partir del procesamiento de imágenes satelitales (pp. 20-30). Lima: Unidad Ejecutora 001631.

Mota de Cabrera, C. (2006). El rol de la escritura dentro del currículo de la enseñanza y aprendizaje del inglés como segunda lengua (esl/efl): Una perspectiva histórica. Acción Pedagógica, 15(1), 56-63. <http://www.saber.ula.ve/accionpe/>

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

Montealegre, J. y Pabón, J. (2000). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. Meteorología. Colombia, 2, 7-21. ISSN 0124-6984.

Muñoz, C. (2008). Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del río Segura: Cuenca del río Mundo. [Tesis de

- pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Crai UPC biblioteca: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/738>
- Naciones Unidas, (1991). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático. Informe final de la convención. GE.05-62301 (S) 220705 220705. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Revista OSGeo numero 2. Creative Commons Atribución. Libro recuperado de: https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. Manual formativo. ISSN 1888-6051, Nº. 62, 2012, págs. 17-31.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- 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>
- Otero, J. S. (2010). Introduccion al Diseño Experimental. jsanchez@puce.edu.ec
- 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>
- Pellitero, R. (2014). Evolución del Balance de Masas y Retroceso Glaciar en el Nevado Artesonraju (Cordillera Blanca, Perú). Tesis de pregrado. Universidad del País Vasco. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/30075/TFG_Gancedo.pdf;jsessionid=A8C27F0C843613756B08D4421452BCE8?sequence=1
- Peña, J. (2015). Análisis multitemporal del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy ubicada en los departamentos de Boyacá y Arauca entre los años

- 1993, 2003 y 2014. [Tesis de pregrado. Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio RI UMNG: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/13551>
- Pérez, D. (2012). Identificación de ecosistemas en la Provincia de Napo - Ecuador mediante análisis digital de imágenes satelitales. [Tesis de postgrado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio USFQ: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2177>
- Pérez, N., Cuervo, A., y Lamus, F. (2015). Levantamiento de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. Univesidad de los Andes.16.01-06. https://www.researchgate.net/publication/330912898_Levantamiento_de_la_Cordillera_Oriental_de_los_Andes_colombianos
- Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci.* EISSN: 2215-3896. Vol 50(1): 25-39. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.50-1.2>
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), pp. 201-222. https://www.researchgate.net/publication/284691636_La_hidroclimatologia_de_Colombia_Una_sintesis_desde_la_escalainter-decadal_hasta_la_escaladiurna
- 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., 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. DOI: 10.5194/tc-7-81-2013

- Rabatel, A., Ceballos, J., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., Mölg, N., Ménégoz, M., Huggel, C., Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colobian glaciers?. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100 (1), pp. 75-95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>
- Racoviteanu, A.; Paul, F.; Raup, B.; Khalsa, S. y Armstrong, R. (2008). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008. Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop. Doi: 10.3189/172756410790595804
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, (2019). Registro oficial suplemento 507. Decreto ejecutivo 752. (12 de junio del 2019).
- Rodríguez S., (2007). Protocolo de Kyoto: debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático. *Gestión y Ambiente*, 10(2),119-128. [fecha de Consulta 4 de Septiembre de 2020]. ISSN: 0124-177X. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1694/169419816010>
- Rojas, E., Arce, B., Peña, A., Boshell, F., & Ayarza, M. (2010). Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá. *Revista Corpoica: Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 173–182. <https://doi.org/10.21930/rcta.vol11>
- Saladié, O., Brunet, M., Aguilar, E., Sigró, J. & López, D (2005), Datos de precipitación mensual ajustada del sector nororiental de la península ibérica (1850- 2000), Technical report, Universitat Rovira i Virgili.
- Salazar, J. F. (2011). Regulación biótica del ciclo hidrológico en múltiples escalas. [Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia].
- Salinas, T. (2020). Análisis de la variación de la cobertura glaciaria en el Ecuador mediante teledetección. [Tesis de pregrado]. Repositorio UG: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49982>

- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B.G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, Southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7, 103-118, doi:10.5194/tc-7-103-2013, 2013.
- Samaniego, P., Monzier, M., Robin, C., Hall, M.L. (1998). Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59, 451-459. <https://doi.org/10.1007/s004450050203>
- Samaniego P.; Eissen J.; Monzier M.; Robin C.; Alvarado A.; 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>
- Samaniego P.; Robin C.; Monzier M.; Eissen J.; Mothes P.; Hall M. (2004). El complejo volcánico Cayambe: Síntesis geológica, actividad holocénica y evaluación de los peligros volcánicos. Escuela Politécnica Nacional. [Documento inédito]. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/des-15665>
- 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., Hespings, 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. http://www.serviciometeorologico.gob.ec/docum_institucion/Publicaciones/atlasglaciares.pdf
- Serrano, E., González, J. y San José, J. (2011). Dinámica, evolución y estructura de los glaciares rocosos de los Pirineos. Cuadernos de Investigación Geográfica. N° 37 (2). Pp. 145-170. ISSN: 0211-6820

- Serrano, S., Zuleta Mediavilla, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & 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>
- Shahzad, U. (2015). Global Warming: Causes, Effects and Solutions. *Durreesamin Journal*,1, 01-07. https://www.researchgate.net/publication/316691239_Global_Warming_Causes_Effects_and_Solutions
- 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.
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., & Gonzalez, J.F. (2009). Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03502, doi:10.1029/2008GL036238
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P. (2013). Resumen técnico de Cambio climático y sus bases físicas. IPCC y PNUMA. ISBN 978-92-9169-338-2
- Tabari H., Marofi S., Aeni A., Talae P.H. y Mohammadi K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agr. Forest Meteorol.* 151 (2), 128-136. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.09.009
- Tapiador, F., Hou, A., de Castro, M., Checa, R., Cuartero, F., & Barros, A. (2011). Precipitation estimates for hydroelectricity. *Energy & Environmental Science*, 4(11), 4435-4448
- Tarbutk, E., Lutgens, F., y Tasa, D. (2005). Glaciares y Glaciaciones. En M. Martín Romo (Ed.), *Ciencias de la Tierra- Una introducción a la geología física*. (pp. 532-562). Pearson Educación S.A.
- Torres, N. y Vivanco, V. (2018). Comparación en la estimación del material particulado PM10 usando imágenes satelitales Landsat 7, Landsat 8 y Modis

en Quito. [Tesis de pregrado]. Repositorio UPS:
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16071>

Valdez, R., Hernández, D., Mendoza, B., Valdés, J., & Maravilla, D. (2003). Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals*, 11(02), 137–144. <https://doi.org/10.1142/S0218348X0300163X>

Valencia, R.; Serrano, D.; Galárraga, R. (2014). Cambios de uso del suelo en cuencas altoandinas y consecuencias en la oferta hídrica. Caso de estudio microcuenca del río Blanco, páramos del Nevado Cayambe, Ecuador. *Revista EPN*, 34, 1, pp. 1-9. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/306

Valencia, R. (2014). Análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en la microcuenca del Río Blanco (Nevado Cayambe), utilizando el modelo de oferta-demanda en ArcGis. [Tesis de pregrado]. Repositorio EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7625>

Vásconez, F., Andrade, D., Bernard., B y Hidalgo, S. (2017). Delimitación 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

Veettil, B., Ruiz, S., Wang, Sh., Valente, P., Bica, A., Becerra, A., Rekowsky, I., Souza, S., Bianchini, N., Bremer, U. y Simoes, C. (2016). Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investig. Geogr. Chile*, 51: 3-36. Repositorio Biblat: <https://biblat.unam.mx/es/revista/investigaciones-geograficas-santiago/articulo/un-analisis-comparativo-del-retroceso-glaciar-en-los-andestropicales-usando-teledeteccion>

Vicens L. (2009). Fuentes y Adquisición de Datos: Lección 9, Clasificación de Imágenes. Programa UNIGIS de Postgrado y Master Internacional a

distancia en Sistemas de Información Geográfica. UNIGIS Girona, Universitat de Girona 9ª Edición, 2009, 15 p.

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.

Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M., y Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, 59, 75–99. DOI:10.1023/a:1024406427519

Warren, C. y Sugden, D. (1993). The Patagonian Icefields: A Glaciological Review. *Arctic and Alpine Research*, 25 (7), 316-331. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00040851.1993.12003018>

Anexos

Anexo 1. Matrices de contingencia y coeficiente Kappa de los años restantes

1. Matriz de contingencia y coeficiente Kappa del año 1991

USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	345	0	0	0	0	345	100%
Roca (2)	0	106	18	0	1	125	84.80%
Suelo erosionado (3)	0	25	122	0	1	148	82.43%
Páramo (4)	0	0	0	70	26	96	72.92%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	18	38	56	67.86%
TOTAL	345	131	140	88	66	770	
Precisión del usuario	100%	80.92%	87.14%	79.55%	57.58%		
Coefficiente Kappa				0.84			
Precisión				88.44%			

2. Matriz de contingencia y coeficiente Kappa del año 1999

USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	306	0	0	0	0	306	100%
Roca (2)	2	74	1	0	1	78	94.87%
Suelo erosionado (3)	0	5	133	0	3	141	94.33%
Páramo (4)	0	0	0	47	4	51	92.16%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	2	86	88	97.73%
TOTAL	308	79	134	49	93	663	
Precisión del usuario	99.35%	93.67%	99.25%	95.92%	92.47%		
Coefficiente Kappa				0.96			
Precisión				97.44%			

3. Matriz de contingencia y coeficiente Kappa del año 2002

USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	144	0	0	0	0	306	100%
Roca (2)	0	25	0	0	0	25	100.00%
Suelo erosionado (3)	0	0	43	0	0	43	100.00%
Páramo (4)	0	0	0	15	7	22	68.18%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	1	17	18	94.44%
TOTAL	144	25	43	16	24	252	
Precisión del usuario	100.00%	100.00%	100.00%	93.75%	70.83%		
Coeficiente Kappa				0.94			
Precisión				96.83%			

4. Matriz de contingencia y coeficiente Kappa del año 2009

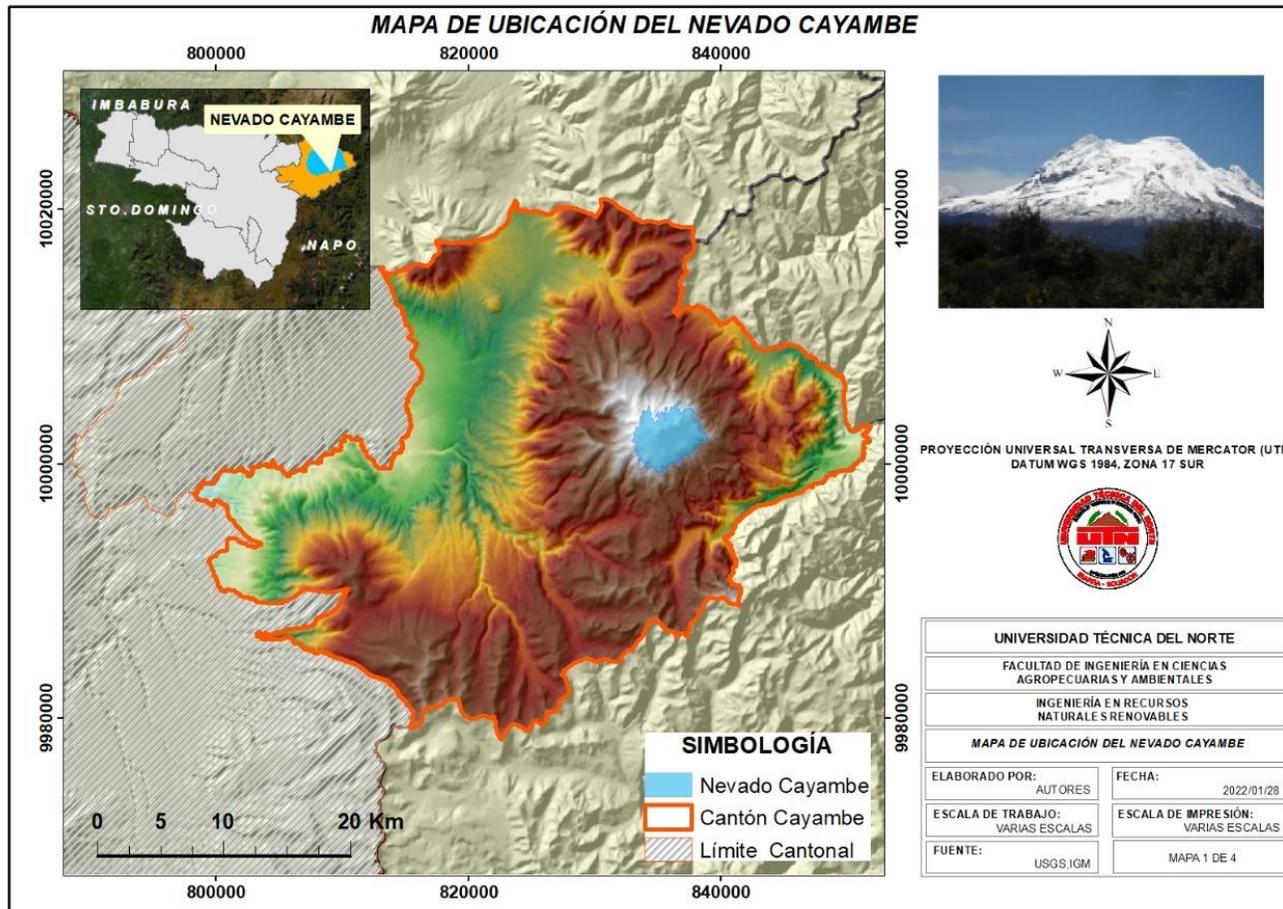
USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	145	0	0	0	0	306	100%
Roca (2)	0	67	9	0	0	76	88.16%
Suelo erosionado (3)	0	3	58	0	0	61	95.08%
Páramo (4)	0	0	17	237	11	265	89.43%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	2	248	250	99.20%
TOTAL	145	70	84	239	259	797	
Precisión del usuario	100.00%	95.71%	69.05%	99.16%	95.75%		
Coeficiente Kappa				0.93			
Precisión				94.73%			

5. Matriz de contingencia y coeficiente Kappa del año 2016

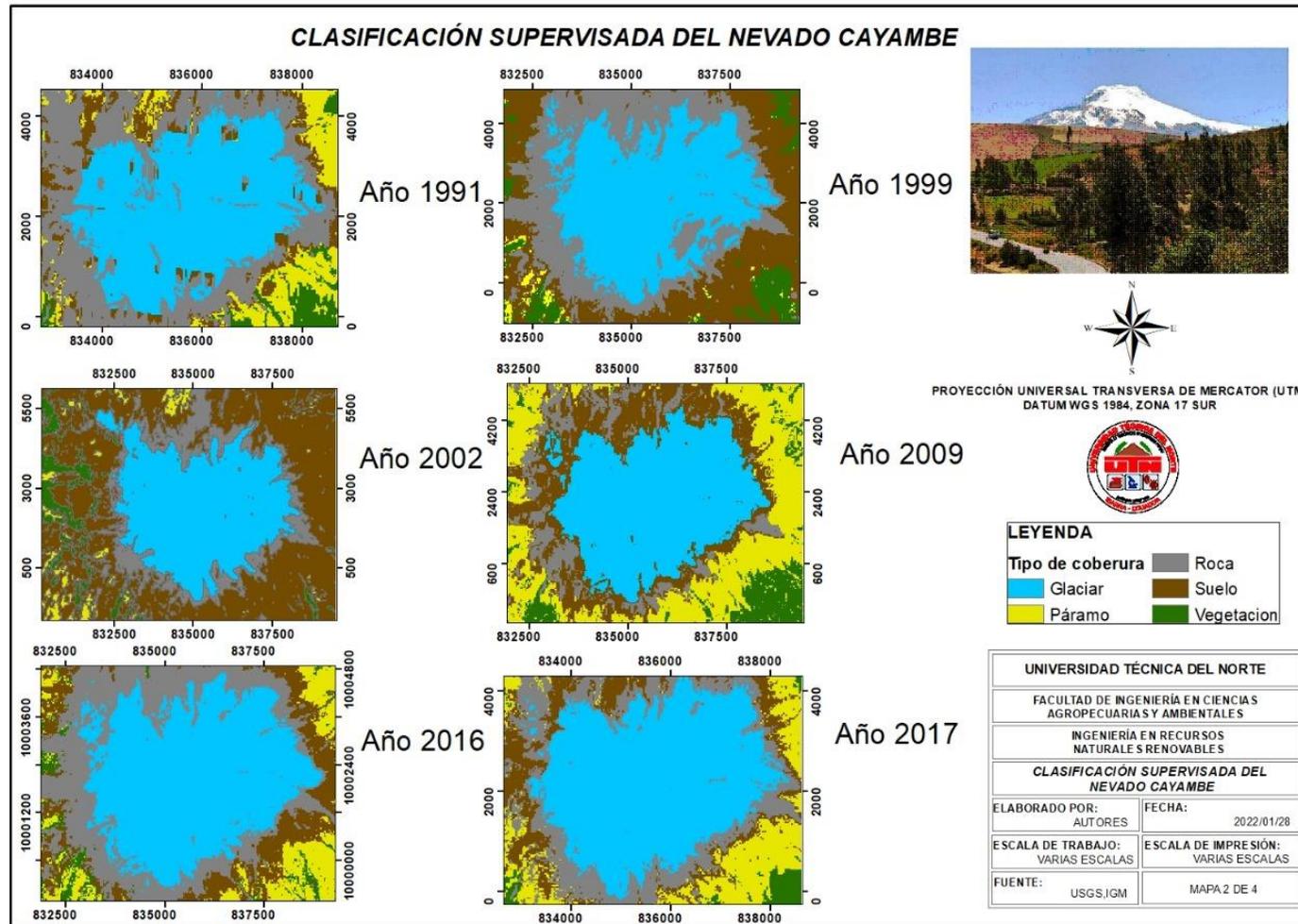
USUARIO	Nieve (1)	Roca (2)	Suelo erosionado (3)	Páramo (4)	Vegetación arbustiva (5)	TOTAL	Precisión de la predicción
Nieve (1)	200	0	0	0	0	306	100%
Roca (2)	11	47	33	1	0	92	51.09%
Suelo erosionado (3)	0	2	64	3	0	69	92.75%
Páramo (4)	1	0	3	114	0	118	96.61%
Vegetación arbustiva (5)	0	0	0	10	55	65	84.62%
TOTAL	212	49	100	128	55	544	
Precisión del usuario	94.34%	95.92%	64.00%	89.06%	100.00%		
Coficiente Kappa				0.84			
Precisión				88.24%			

Anexo 2. Mapas

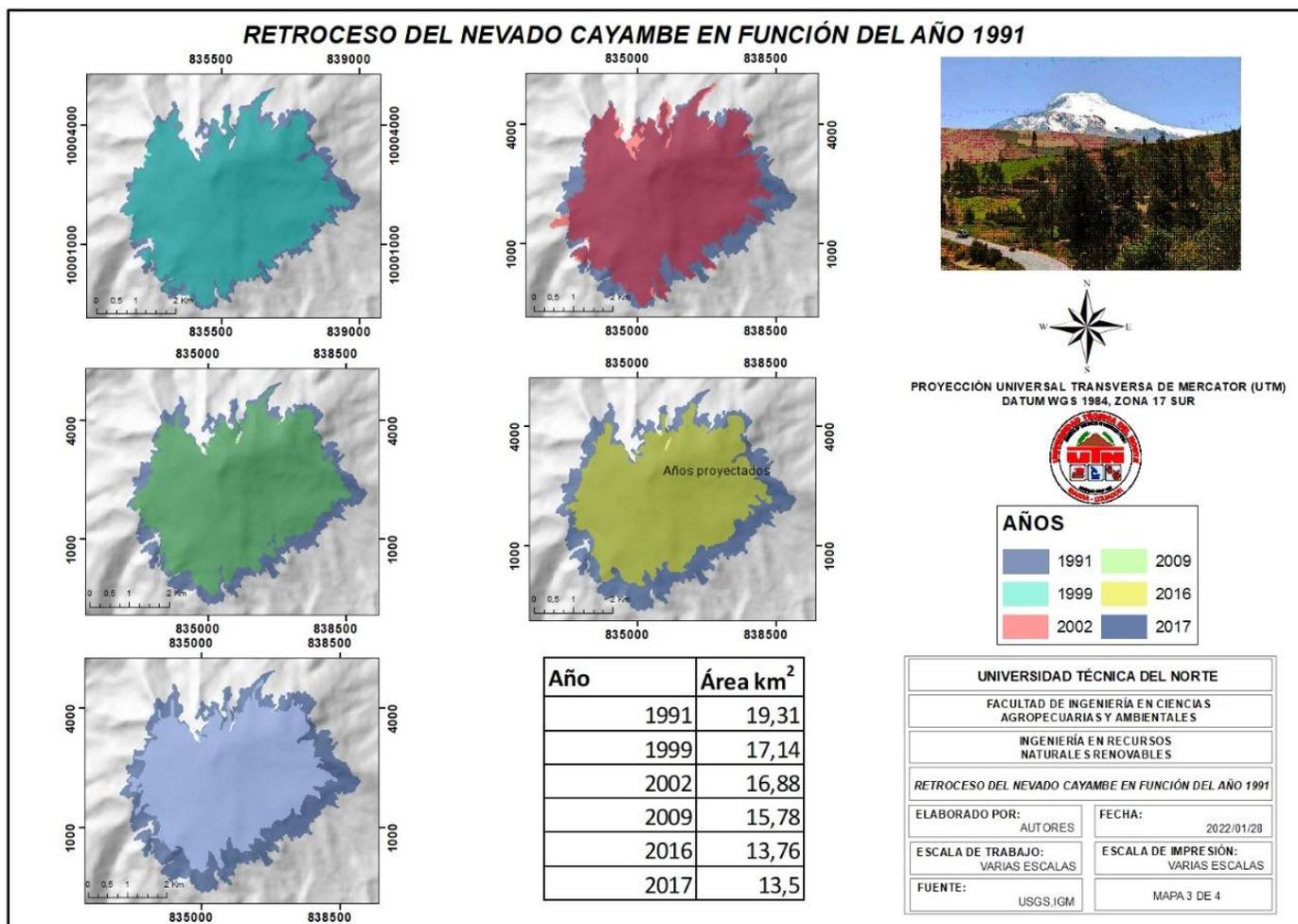
1. Mapa de ubicación del nevado Cayambe



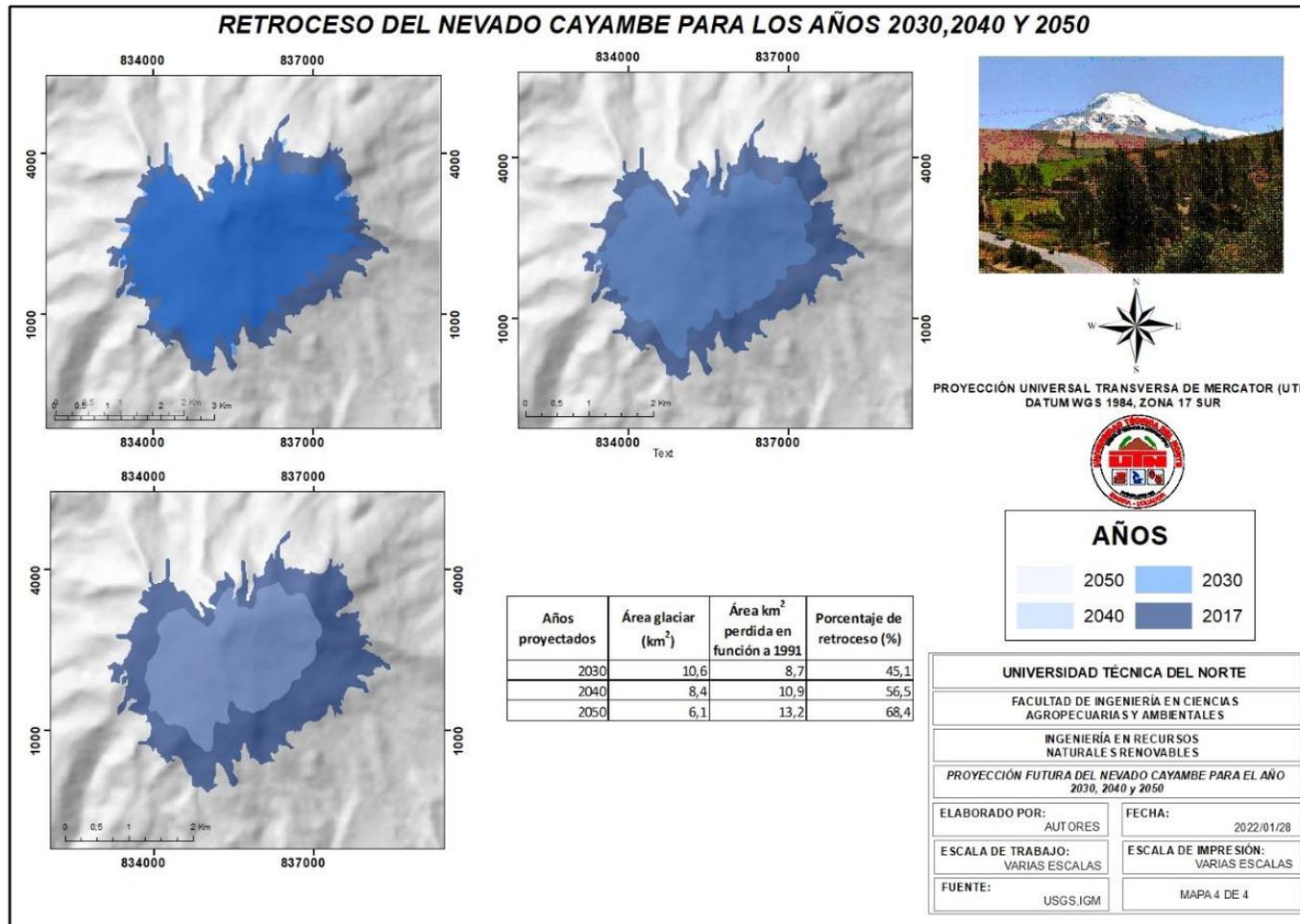
2. Mapa de clasificación supervisada del nevado Cayambe en los años 1991, 1999, 2002, 2009, 2016 y 2017



3. Mapa interactivo del retroceso glaciar del nevado Cayambe de los diferentes períodos



4. Mapa interactivo de la proyección futura del retroceso glaciar del nevado Cayambe



Anexo 3. Evidencias del retroceso glaciar del nevado Cayambe

1. Evidencias de los años 2010 al 2019



2. Evidencias de los años 2006 al 2017

