UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI,

EN EL PERIODO 1995-2025”

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieros Ambientales

Autores:
Enriquez Molina Joricel Jimabel
Zambrano Yanez Anthony Mateo

Tutor:
Ágreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR
Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Enriquez Molina Joricel Jimabel, con cédula de ciudadanía No. 0504800509 y Zambrano Yanez Anthony Mateo, con cédula de ciudadanía No. 0550641831, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"**, siendo el Ingeniero Mg. Edwin Ramiro Cevallos Carvajal, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 3 de febrero del 2026

Joricel Jimabel Enriquez Molina
C.C: 0504800509
ESTUDIANTE

Zambrano Yanez Anthony Mateo
C.C: 0550641831
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **ENRIQUEZ MOLINA JORICEL JIMABEL,** identificada con cédula de ciudadanía **0504800509** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - LA CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Agroindustria, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022 - Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025".**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

b) La publicación del trabajo de grado.

c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 3 días del mes de febrero del 2026.

Joricel Jimabel Enriquez Molina	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CEDENTE	**LA CESIONARIA**

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **ZAMBRANO YANEZ ANTHONY MATEO**, identificado con cédula de ciudadanía **0550641831** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. -EL CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Agroindustrial, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022 - Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

b) La publicación del trabajo de grado.

c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 3 días del mes de febrero del 2026.

Anthony Mateo Zambrano Yanez	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
EL CEDENTE	**LA CESIONARIA**

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025", Enriquez Molina Joricel Jimabel y Zambrano Yanez Anthony Mateo, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 3 de febrero del 2026

Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Enriquez Molina Joricel Jimabel y Zambrano Yanez Anthony Mateo, con el título del Proyecto de Investigación: **"ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 3 de febreroo del 2026

Ing. Marco Antonio Rivera Moreno, Mg.
C.C: 0501518955
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Vincent Benhamín Velastegui Tapia, Mg.
C.C: 0502547649
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIETO

Uno de mis mayores sueños ha sido culminar esta tesis con dedicación y esfuerzo, hoy al alcanzar esta meta, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Dios por guiar mi camino, darme la fortaleza para superar cada dificultad y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mis padres, Rocio Molina y Guido Enriquez, por su amor, apoyo y sacrificio constante, por creer siempre en mí y ser el pilar fundamental que me impulsó a seguir adelante en cada etapa de este proceso. A mis hermanos, Anderson Enriquez, quien siempre me brindó su apoyo económico cuando más lo necesité, además de su amor y respaldo incondicional, siendo para mí un ejemplo a seguir, a mi hermana Mayerli Enriquez, por su apoyo constante, su compañía y por estar presente en los momentos más importantes de este camino y de mi vida.

A mis sobrinas, por su cariño, alegría y motivación constante, quienes con su ternura llenan de felicidad mi vida y me inspiran a seguir adelante.

A mi novio, Mateo Zambrano, por su amor, paciencia y por sostener mi mano durante esta larga etapa de mi vida, acompañándome con comprensión y motivación en los momentos de dificultad.

Expreso mi agradecimiento al Ingeniero Oscar Rosales y al Ingeniero Josué Montalvo por su apoyo, orientación y dedicación durante el desarrollo del presente trabajo de investigación. Su disposición para ayudar y compartir sus conocimientos fue fundamental para la culminación de este proceso académico.

Finalmente, a mis amigos, quienes con su amistad, apoyo y palabras de aliento hicieron este proceso más llevadero. A todos ustedes, gracias por formar parte de este sueño que hoy se convierte en una meta cumplida y por contribuir de una u otra manera en este logro tan importante de mi vida.

Joricel Jimabel Enriquez Molina

AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo de tesis a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Edison Fernández Zambrano Estupiñán y Laura Alexandre Yánez, por su amor, apoyo y por ser el pilar fundamental en mi formación.

A mi novia, Joricel Enriquez, por su amor, paciencia y por acompañarme durante este proceso, brindándome ánimo y apoyo constante.

Y a mis amigos, por su amistad y motivación constante.

Con cariño, dedico este logro a cada uno de ustedes.

Anthony Mateo Zambrano Yanez

DEDICATORIA

La culminación de este trabajo representa un logro significativo en mi vida y es el resultado del esfuerzo, la perseverancia y el apoyo de las personas que han estado presentes a lo largo de este camino. Por ello, dedico este logro a mis padres, por su amor, ejemplo y sacrificio, quienes han sido la base fundamental para alcanzar mis metas. A mis hermanos, por su apoyo, compañía y motivación constante, y a mi novio, por su comprensión, paciencia y apoyo durante este proceso, siendo una fuente de ánimo para seguir adelante y culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Joricel Jimabel Enriquez Molina

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Edison Fernández Zambrano Estupiñán y Laura Alexandre Yánez, por su amor, apoyo y por ser el pilar fundamental en mi formación.

A mi novia, Joricel Enríquez, por su amor, paciencia y por acompañarme durante este proceso, brindándome ánimo y apoyo constante.

A mi primo, Josué Montalvo, por su apoyo y ayuda durante el desarrollo de esta tesis.

Y a mis amigos, por su amistad y motivación constante.

Con cariño, dedico este logro a cada uno de ustedes.

Anthony Mateo Zambrano Yanez

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: "ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL RETROCESO GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI, EN EL PERIODO 1995-2025"

Autores:
Joricel Jimabel Enriquez Molina
Anthony Mateo Zambrano Yanez

RESUMEN

Los glaciares Andinos constituyen uno de los indicadores más sensibles del cambio climático en los ecosistemas de alta montaña, debido a su vulnerabilidad frente a las variaciones de temperatura, precipitación y radiación solar. En el caso del Volcán Cotopaxi, la reducción de la cobertura glaciar representa una preocupación ambiental relevante por su influencia en la estabilidad de los ecosistemas altoandinos y la gestión de riesgos naturales. El presente estudio tuvo como objetivo analizar el retroceso glaciar del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995-2025 mediante técnicas de teledetección y análisis estadístico de variables climáticas. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron imágenes satelitales Landsat obtenidas desde la plataforma Earth Explorer, seleccionadas en función de su calidad radiométrica y bajo porcentaje de nubosidad. Las imágenes fueron sometidas a procesos de corrección radiométrica con el fin de garantizar la precisión y comparabilidad de los datos en el análisis multitemporal. Posteriormente, se aplicó el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) y una clasificación supervisada mediante el coeficiente Kappa. Así mismo, se incorporaron registros climáticos de temperatura, precipitación y radiación solar analizados mediante pruebas estadísticas no paramétricas como Mann-Kendall y correlación Pearson. Los resultados evidenciaron un retroceso glaciar acumulado del 76,92% entre 1995 y 2025, pasando de 26,84 km^2 a 6,19 km^2,confirmando una disminución progresiva. Se identificaron reducciones significativas en 2001, 2015 y 2023, descartándose 2015 con una superficie mínima de 4,40km^2 ,asociada al incremento térmico, la variabilidad climática y la actividad eruptiva del volcán Cotopaxi y resaltan la importancia del monitoreo continuo mediante teledetección para la gestión ambiental y la planificación territorial en ecosistemas de alta montaña.

Palabras claves: Cambio Climático, Teledetección, NDSI, retroceso glaciar, Volcán Cotopaxi

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES

TITLE: "ANALYSIS USING REMOTE SENSING OF GLACIER RETREAT ON THE COTOPAXI VOLCANO, 1995-2025"

Authors:
Joricel Jimabel Enriquez Molina
Anthony Mateo Zambrano Yanez

ABSTRACT

Andean glaciers are among the most sensitive indicators of climate change in high-mountain ecosystems due to their vulnerability to variations in temperature, precipitation, and solar radiation. In case of Cotopaxi Volcano, the reduction in glacier coverage represents a significant environmental concern because of its influence on the stability of high Andean ecosystems and natural risk management. This study aimed to analyze the glacier retreat of Cotopaxi Volcano during the period 1995–2025 using remote sensing techniques and statistical analysis of climate variables. Landsat satellite images obtained from the EarthExplorer platform were used for the analysis, selected based on their radiometric quality and low cloud cover percentage. The images were subjected to radiometric correction processes to ensure the accuracy and comparability of data in the multitemporal analysis. Subsequently, the Normalized Difference Snow Index (NDSI) and a supervised classification validated through the Kappa coefficient were applied. Additionally, climate records of temperature, precipitation, and solar radiation were incorporated and analyzed using nonparametric statistical tests such as Mann–Kendall and Pearson correlation. The results showed a cumulative glacier retreat of 76.92% between 1995 and 2025, decreasing from 26.84 km² to 6.19 km², confirming a progressive decline in glacier coverage. Significant reductions were identified in 2001, 2015, and 2023, with the minimum glacier area recorded in 2015 (4.40 km²), associated with increased temperature, climate variability, and the eruptive activity of Cotopaxi Volcano. These findings highlight the importance of continuous monitoring through remote sensing for environmental management and territorial planning in high-mountain ecosystems.

Keywords: climate change, remote sensing, NDSI, glacier retreat, Cotopaxi Volcano.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA ii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR iii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR v

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN vii

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN viii

AGRADECIMIETO ix

AGRADECIMIENTO x

DEDICATORIA xi

DEDICATORIA xii

RESUMEN xiii

ABSTRACT xiv

ÍNDICE DE CONTENIDOS xv

ÍNDICE DE TABLAS xix

ÍNDICE DE FIGURAS xx

ÍNDICE DE AXNESOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

2. INTRODUCCIÓN 2

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 3

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO 5

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 5

6. OBJETIVOS 7

6.1. General 7

6.2. Específicos 7

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS CON RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 8
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA 9
8.1. Volcán 9
8.2. Glaciar 9
8.3. Tipos de glaciares 9
8.4. Los glaciares de circo 9
8.5. Cambio Climático 10
8.6. Calentamiento global 10
8.7. Gases de efecto invernadero 10
8.8. Radiación Solar 10
8.9. Retroceso de glaciar 11
8.10. Teledetección 11
8.11. Imágenes Satelitales 11
8.12. Landsat 12
8.13. Corrección radiométrica 12
8.14. Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) 12
8.15. Falso Color 13
8.16. Evaluación multitemporal 14
8.17. Función de la evaluación Multitemporal 14
8.18. Índice Kappa 14
8.19. Método Mann-Kendall 14
8.20. Método de Pearson 15
9. PREGUNTA CIENTÍFICA 16
10. AREA DE ESTUDIO 16

11. METODOLOGÍA 17
11.1. Tipo de investigación y enfoque de investigación 17
11.1.1. Tipo de investigación 17
11.1.2. Enfoque de la investigación 17
11.2. Métodos 17
11.2.1. Método de análisis multitemporal 17
11.2.2. Método de teledetección 18
11.2.3. Método Estadístico 18
11.3. Técnicas e Instrumentos 19
11.3.1. Técnicas 19
11.3.2. Instrumentos 25
11.4. Equipos y Herramientas 26
11.5. Diagrama metodológico 27
12. COMPROBACIÓN A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 28
13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 29
13.1. Cálculo del índice de normalización diferencial de nieve (NDSI) 29
13.2. Evolución del glaciar del volcán Cotopaxi por años 30
13.3. Tendencia general del retroceso glaciar 40
13.4. Matriz de contingencia e índice Kappa 40
13.5. Cálculo de tasa de cambio anual 43
14. TENDENCIAS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SU RELACIÓN CON EL RETROCESO GLACIAR 44
14.1. Análisis climático 44
14.2. Análisis estadístico de tendencias Mann-Kendall 45
14.3. Análisis de Tendencia de precipitación Mann Kendall 46

14.4. Análisis de Tendencia de Radiación solar Mann Kendall 47
14.5. Análisis de correlación de Pearson 48
15. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 51
15.1. Conclusiones 51
15.2. Recomendaciones 51
16. BIBLIOGRAFÍA 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios del proyecto 5

Tabla 2 Actividades de sistemas de tareas 8

Tabla 3. Significancia de la prueba Mann Kendall 24

Tabla 4. Rango de valor de correlación r 25

Tabla 5. Equipos y Herramientas 26

Tabla 6 Clasificación de tres clases 41

Tabla 7 Valores índice Kappa 41

Tabla 8 Matriz de contingencia de la clasificación supervisada de la imagen Landsat 2025 42

Tabla 9 Tasa de cambio anual del Volcán Cotopaxi obtenidas de la clasificación supervisada 43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del volcán Cotopaxi 16

Figura 2 Diagrama Metodológico 27

Figura 3 Glaciar del volcán Cotopaxi 1995 30

Figura 4 Glaciar del volcán Cotopaxi 2001 31

Figura 5 Glaciar del volcán Cotopaxi 2005 32

Figura 6 Glaciar del volcán Cotopaxi 2011 33

Figura 7 Glaciar del volcán Cotopaxi 2015 34

Figura 8 Glaciar del volcán Cotopaxi 35

Figura 9 Glaciar del volcán Cotopaxi 2021 36

Figura 10 Glaciar del volcán Cotopaxi 37

Figura 11 Glaciar del volcán Cotopaxi 2023 38

Figura 12 Glaciar del volcán Cotopaxi 39

Figura 13 Grafico de dispersión 40

Figura 14 Gráfico de tendencia de temperatura media 45

Figura 15 Gráfico de tendencia de precipitación 47

Figura 16 Gráfico de tendencia de Radiación solar 48

Figura 17 Análisis de la temperatura media mediante la correlación de Pearson 49

Figura 18 Análisis de la Precipitación mediante la correlación de Pearson 49

Figura 19 Análisis de la radiación solar mediante la correlación de Pearson 50

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Análisis mediante teledetección del retroceso glaciar del Volcán Cotopaxi en el periodo 1995-2025.

Fecha de inicio:

Octubre 2025

Fecha de finalización:

Marzo 2026

Lugar de ejecución:

Parroquia Mulalo- Cantón Latacunga-Provincia Cotopaxi- Zona 3

Facultad que auspicia

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia:

Carrera de Ingeniería Ambiental

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación: Ing. José Luis Agreda Oña,Mg

Nombre de los investigadores: Joricel Jimabel Enriquez Molina, Anthony Mateo Zambrano Yanez.

Lector 1: Ing. Rivera Moreno Marco Antonio, Mg

Lector 2: Ing. Benjamín Vincent Velastegui, Mg

Lector 3: Fonseca Largo Kalina Marcela, P.h.D

Área de Conocimiento:

Ciencias Ambientales

Línea de investigación:

Análisis, conservación y aprovechamiento racional de la biodiversidad, fauna y recursos naturales para el desarrollo sustentable y la prevención de desastres naturales

Sub línea de Investigación:

Manejo y conservación de la biodiversidad

Línea de vinculación de la carrera:

Gestión de Recursos Naturales, Impactos, Análisis metodológico sobre sostenibilidad ambiental para el desarrollo humano social.

2. INTRODUCCIÓN

Los glaciares que se desarrollan sobre volcanes constituyen sistemas glaciares altamente sensibles a las variaciones climáticas y a los procesos geotérmicos propios del glaciar. Su evolución depende de las condiciones atmosféricas, especialmente de la temperatura del aire y de la precipitación, así como del flujo de calor generado por la actividad volcánica, factores que influyen en el balance energético del glaciar y pueden acelerar los procesos de fusión de hielo (Gualco et al., 2022)

El estudio de (Zemp et al., 2019a), han evidenciado que los glaciares presentes en volcanes han experimentado un retroceso significativo durante las últimas décadas como consecuencias del incremento de la temperatura atmosférica y de las modificaciones en los patrones climáticos regionales. El aumento de la temperatura del aire intensifica los procesos de fusión de hielo, mientras que en las variaciones en la precipitación solida influyen directamente en los procesos de acumulación glaciar, generando desequilibrios en el balance de masa de los glaciares volcánicos (Pique et al., 2017).

En sistemas volcánicos cubiertos por hielo, el retroceso glaciar también puede verse intensificado por factores asociados a la actividad volcánica, como la deposición de ceniza sobre la superficie glaciar, la cual reduce la difusión del hielo y aumenta la absorción de radiación solar, acelerando los procesos de fusión (Gelman Constantin et al., 2020) .

En Sudamérica, varios volcanes de gran altitud presentan cobertura glaciar en sus cumbres, entre ellos el Nevado del Ruiz Colombia, el Coropuna en Perú y en Cotopaxi, donde se han registrado reducciones significativas en la extensión de sus glaciares durante las últimas décadas (Sakakibara & Sugiyama, 2018). En el caso del Nevado del Ruiz, la superficie glaciar disminuyo aproximadamente $17km^2$ en 1985 a cerca de $8km^2$ en 2016, lo que representa una perdida cercana al 50% de su cobertura glaciar (Sakakibara & Sugiyama, 2018b). De manera similar, el nevado Coropuna en Peru, considerado uno de los volcanes más extensos del país,

ha experimentado una reducción aproximada del 26% de su superficie glaciar entre 1980 y 2014, asociada principalmente al incremento de la temperatura del aire (Veettil et al., 2016). En el caso del volcán Cotopaxi en Ecuador, estudios basados en análisis fotogramétricos e imágenes satelitales han estimado que la cobertura glaciar se redujo aproximadamente $28km^2$ a finales del siglo XX a cerca de $13km^2$ hacia el año 2016, evidenciando una perdida significativa de masa glaciar (Fountain et al., 2016). Estas reducciones de la superficie glaciar han sido asociadas principalmente al incremento de la temperatura y aire, factores que afectan directamente los procesos de acumulación y ablación glaciar en volcanes cubiertos por hielo (Lukács et al., 2018).

El volcán Cotopaxi constituye uno de los sistemas volcánicos más representativos del país, debido a la presencia de un casquete glaciar que históricamente ha cubierto gran parte de un cono volcánico (Jia et al., 2018). Frente a esta problemática ambiental, el uso de técnicas de teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para el monitoreo de los cambios en la cobertura glaciar, permitiendo analizar imágenes satelitales multitemporales para identificar variaciones en la superficie del hielo y cuantificar las tasas de retroceso glaciar en volcanes cubiertos por glaciares (Robson et al., 2020). Estas metodologías permiten evaluar la evolución espacial y temporal de los glaciares mediante herramientas de procesamiento digital y sistemas de información geográfica, facilitando la comprensión de los factores climáticos que influyen en la dinámica glaciar (Veettil et al., 2017).

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La generación de información ambiental confiable constituye un elemento fundamental para comprender la dinámica de los ecosistemas naturales de altitud y su relación con las variaciones climáticas. En estas regiones, la disponibilidad de datos espaciales y temporales permite evaluar cambios ambientales que influyen en el equilibrio y en el funcionamiento de los recursos hídricos (Seehaus et al., 2019).

Las regiones altoandinas presentan una elevada sensibilidad frente a las variaciones climáticas, lo que les convierte en áreas estratégicas para el análisis de procesos ambientales relacionados con el clima. La información generada a partir de investigaciones ambientales en estos territorios permite comprender las interacciones entre el clima y los recursos hídricos que sustentan diversos sistemas naturales (Zemp et al., 2019b).

El uso de herramientas de teledetección se ha consolidado como una metodología eficiente para el análisis ambiental de regiones de difícil acceso, debido a que permite obtener información geoespacial precisa mediante imágenes satelitales multitemporales. Estas herramientas facilitan el monitoreo de cambios ambientales a lo largo del tiempo y aportan información científica relevante para la evaluación de procesos ambientales en zonas de gran altitud (Gorelick et al., 2017).

El análisis multitemporal de imágenes satelitales permite identificar cambios en la superficie terrestre y cuantificar su evolución mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes y sistemas de información geográfica. Este tipo de estudios genera información ambiental que contribuye a comprender la dinámica de los sistemas naturales y su relación con las variaciones climáticas (Fang et al., 2024).

La presente investigación busca generar información geoespacial actualizada sobre la dinámica del glaciar del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995-2025 mediante técnicas de teledetección y análisis estadístico de variables climáticas. Los resultados obtenidos constituyen insumos ambientales, tales como mapas multitemporales de cobertura glaciar, análisis de tendencias climáticas y bases de datos geoespaciales, que contribuyen al conocimiento científico de estas regiones y pueden apoyar procesos de monitoreo ambiental, planificación territorial y conservación ambiental frente a los efectos del cambio climático (Huss & Hock, 2018).

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios del proyecto comprenden, de manera directa, a la comunidad académica y técnico – científica, al fortalecerse la generación de conocimiento especializado, metodologías de análisis geoespacial y bases de datos multitemporales sobre el glaciar.

De forma indirecta, los resultados benefician a las poblaciones localizadas en el área de influencia del volcán Cotopaxi, al construir insumos técnicos para la planificación territorial, la gestión integrada del recurso hídrico y el diseño de estrategias de adaptación frente a los efectos del cambio climático.

Tabla 1.

Beneficiarios del proyecto

Tipo de beneficiarios	Total, estimado	Hombres	Mujeres
Canton Latacunga	217,261	106,805	110,456
Comunidades rurales cercanas al Volcán Cotopaxi	271,455	133,203	138,252
Investigadores Científicos	3,200	1,760	1,740
Total, general	491,916	241,768	250,148

Fuente. Instituto Nacional de estadística y censo; secretaria nacional de planificación

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El retroceso de los glaciares constituye una de las evidencias más claras del cambio climático actual, asociado principalmente al incremento sostenido de la temperatura atmosférica y a las alteraciones en los patrones de precipitación. Este fenómeno ha generado una reducción progresiva de la masa y extensión de los glaciares a nivel mundial, provocando cambios significativos en los sistemas hidrológicos y en los sistemas de alta montaña que dependen del almacenamiento natural de agua en forma de hielo. La pérdida glaciar incrementa la vulnerabilidad ambiental al favorecer procesos como inundaciones, deslizamientos,

formación de lagunas inestables y disminución de la disponibilidad de agua dulce para consumo humano y actividades productivas (Newton et al., 2018).

En Ecuador, los glaciares andinos han experimentado un retroceso significativo durante las últimas décadas, evidenciándose en volcanes como Cotopaxi, Antisana y Cayambe, donde la reducción de la cobertura de hielo ha expuesto geoformas propias de ambientes fríos como rocas desnudas y depósitos glaciares, considerados indicadores del retroceso histórico del glaciar. Investigaciones realizadas en sistemas glaciares ecuatorianos han demostrado que estos cambios afectan directamente la regulación hídrica y la estabilidad ambiental de los ecosistemas altoandinos, comprometiendo servicios ecosistémicos fundamentales como el almacenamiento y provisión de agua (Brito Chasiluisa, 2014; Zapata Tapia, 2015).

La evidencia geológica demuestra que las erupciones históricas del Cotopaxi han generado lahares de gran magnitud capaces de desplazarse más de 100 km a lo largo de los valles fluviales, afectando áreas pobladas del valle interandino y zonas cercanas a ciudades como Latacunga. Investigación recientes sobre depósitos de lahares y dinámica volcánica confirman que los cambios en la cobertura glaciar y las condiciones climáticas influyen directamente en la generación y magnitud de estos eventos, constituyendo una amenaza natural significativa para las poblaciones asentadas en las zonas de influencia del volcán (Cárdenas Tamayo, 2022; Povea Cañar, 2020).

Así mismo, investigaciones sobre la morfología volcánica han identificado modificaciones recientes en las cumbre del Cotopaxi asociadas a procesos eruptivos y condiciones climáticas, lo que demuestra la interacción entre la dinámica glaciar y la actividad volcánica en la evolución del paisaje de alta montaña (Crespo Solís, 2025). Estas transformaciones generan impactos ambientales importantes, como la alteración de los ecosistemas de paramo, la perdida de hábitats especializados y la modificación del régimen

hidrológico que sustenta actividades agrícolas, ganaderas y el abastecimiento de agua para consumo humano.

La problemática del retroceso glaciar del volcán Cotopaxi no solo representa un fenómeno físico asociado al cambio climático, sino también un problema ambiental y social que afecta la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad de las poblaciones cercanas. Por ello resulta necesario analizar de manera precisa la dinámica espacio- temporal del retroceso glaciar mediante herramientas de teledetección, que permitan cuantificar los cambios ocurridos y generar información científica que contribuya a la gestión ambiental, la reducción de riesgos y la planificación territorial frente a escenarios de cambio climático.

6. OBJETIVOS

6.1. General

Analizar el retroceso glaciar del Volcán Cotopaxi del periodo 1995-2025 mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica

6.2. Específicos

Delimitar la superficie glaciar del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995 – 2025 a partir del cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) utilizando imágenes satelitales multitemporales.

Determinar la variación espacio – temporal de la cobertura glaciar a partir del cálculo de tasas de cambio anual y porcentajes de reducción del área glaciar.

Evaluar la relación entre los cambios de la superficie glaciar y las variables climáticas mediante análisis estadísticos de correlación de Pearson y tendencia Mann Kendall.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS CON RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Para desarrollar esta investigación fue necesario organizar una serie de actividades que permitan cumplir los objetivos planteados de manera ordenada y clara. En la Tabla 2 se presentan los objetivos específicos del estudio, junto con las actividades que se realizaran, la metodología que se aplicara y los resultados que se espera obtener.

Tabla 2

Actividades de sistemas de tareas

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	METODOLOGÍA	RESULTADOS
- Delimitar la superficie glaciar del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995 – 2025 a partir del cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) utilizando imágenes satelitales multitemporales.	-Selección de imágenes Landsat, delimitación del área de estudio y aplicación del índice NDSI.	- Procesamiento digital de imágenes y análisis en SIG.	- Mapas de cobertura glaciar delimitada.
-Determinar la variación espacio – temporal de la cobertura glaciar a partir del cálculo de tasas de cambio anual y porcentajes de reducción del área glaciar.	-Cálculo del área glaciar para cada año y comparación temporal.	- Análisis espacial y cálculos de variación anual y porcentual.	-Valores de correlación y tendencias climáticas.
-Evaluar la relación entre los cambios de la superficie glaciar y las variables climáticas mediante análisis estadísticos de correlación de Pearson y tendencia Mann Kendall.	- Organización de datos glaciar–climáticos y análisis estadístico.	- Correlación de Pearson y prueba de tendencia Mann-Kendall.	-Valores de correlación entre variables climáticas representado en gráficos estadísticos

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. Volcán

Un volcán es básicamente una abertura o grieta en la corteza terrestre conectada a una cámara magmática y por la cual los materiales incandescentes en forma magma (lava, gas y líquidos a altas temperaturas) del interior de un planeta emergen y se acumulan en la superficie de este (Rodriguez, 2023)

8.2. Glaciar

Los glaciares son enormes e increíblemente poderosos, pero comienzan con pequeños copos de nieve. Cada copo de cristal delicado y con forma de encaje es diferente a cualquier otro; imagine cuántos se necesitan para formar un glaciar a medida que la nieve se transforma gradualmente en hielo glaciar. Un glaciar es una enorme masa de nieve, hielo, roca, sedimentos y agua acumulada durante muchos años. Se origina en la tierra y se desplaza pendiente abajo bajo la influencia de su propio peso y gravedad. Cada glaciar es diferente en su propia forma especial y cada glaciar tiene un entorno circundante (Earth Science Data Systems, 2024)

8.3. Tipos de glaciares

Según los tipos de glaciares, su morfología, dinámica y ubicación geográfica, existen cinco tipos de glaciares, los cuales presentan características y comportamientos diferenciados frente a las variaciones climáticas (Temovski et al., 2018).

8.4. Los glaciares de circo

Se desarrollan en depresiones semicirculares llamadas circos glaciares, se encuentran en las partes más altas de los sistemas montañosos. Estos glaciares ocupan cuencas profundas y pueden ser el inicio de un glaciar de valle si su hielo progresa hacia abajo, o pueden permanecer como pequeños cuerpos de hielo aislados en las cabeceras de los valles (Li et al., 2025).

8.5. Cambio Climático

El cambio climático es un cambio del clima atribuido de forma directa o indirecta a la actividad humana, que altera la composición de la atmosfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables de tiempo. El termino también puede referirse a un cambio en el estado del clima identificable (análisis estadísticos) debido a variaciones en promedios y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente en décadas o más (Diaz Cordero, 2012).

8.6. Calentamiento global

El calentamiento global está causado por el aumento masivo de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, en la atmosfera, resultado de la quema de combustible fósiles y la deforestación (Menzie, 2022)

8.7. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos presentes en la atmosfera terrestre que tienen la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja, contribuyendo al mantenimiento de la temperatura del planeta mediante el denominado efecto invernadero natural. Entre los principales gases de efecto invernadero se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el vapor de agua, los cuales desempeñan un papel fundamental en el sistema climático al regular el balance energético de la Tierra (Valone, 2021).

8.8. Radiación Solar

Constituye la principal fuente de energía del sistema climático terrestre, ya que controla los procesos atmosféricos, oceánicos y superficiales mediante la transferencia de energía electromagnética proveniente del Sol. La cantidad de energía solar que alcanza la parte superior de la atmosfera, la cual presenta pequeñas variaciones asociadas a los ciclos de actividad solar,

pero que pueden influir en el balance energético del planeta y, por ende, en el clima global (Kopp & Lean, 2011).

8.9. Retroceso de glaciar

Un glaciar es un río de hielo de movimiento lento formado durante miles de años por la nieve compactada. El retroceso de un glaciar ocurre cuando este pierde más hielo del que gana; esto sucede cuando las temperaturas suben, lo que reduce las nevadas y aumenta el derretimiento (Diaz & Calla, 2025).

8.10. Teledetección

Un sistema de teledetección se compone de varios elementos que trabajan en conjunto para obtener, procesar y analizar información de la superficie terrestre o de objetos desde una distancia. Los componentes de un sistema de teledetección trabajan en conjunto para permitir la adquisición, procesamiento e interpretación de datos sobre la superficie terrestre. Desde energía utilizada para capturar información hasta la plataforma que transporta sensores, cada componente es esencial para garantizar la precisión y utilidad de los datos recolectados (Robalo Cabrera et al., 2025).

8.11. Imágenes Satelitales

La imagen de satélite en un conjunto de matrices en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este dependerán de la resolución espacial del sensor. La resolución espacial está relacionada con la superficie que cada imagen cubre sobre el terreno (Baño Espinoza & Heredia Páez, 2021).

Esta energía electromagnética es representada en cada píxel por un valor digital que se le agrega una tonalidad, este valor numérico se denomina Nivel Digital (ND). El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual, o si prefiere, a un nivel de gris mediante cualquier convertidor digital –

analógico, la cantidad de niveles digitales a representar dependerá de resolución radiométrica del sensor (Baño Espinoza & Heredia Páez, 2021).

8.12. Landsat

Es la iniciativa de observación terrestre por satélite de mayor duración, iniciada en 1972 por la NASA y el U.S Geological Survey (USGS). Sus satélites han recopilado imágenes multiespectrales de alta calidad durante más de cinco décadas, brindando datos consistentes para estudiar cambios en la cobertura terrestre, vegetación, cuerpos de agua, glaciares, uso del suelo y procesos ambientales globales. La continuidad temporal y la calibración rigurosa de sus sensores permiten comparar imágenes a lo largo de los periodos con confianza científica, lo cual es esencial para análisis de tendencias ambientales y climáticas (Wulder et al., 2022).

8.13. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es un proceso fundamental en el procesamiento de imágenes satelitales, ya que permite ajustar los valores digitales registrados por el sensor para que representen de manera precisa la reflectancia real de la superficie terrestre. Según (Pons et al., 2014), las imágenes Landsat pueden presentar variaciones radiométricas asociadas a diferencias en la calibración del sensor, condiciones atmosféricas y geometría de iluminación, lo que afecta la comparabilidad entre escenas adquiridas en distintas fechas.

8.14. Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI)

Es una técnica ampliamente utilizada en teledetección para identificar y delimitar la presencia de nieve y hielo en la superficie terrestre a partir de imágenes satelitales. Este índice se basa en las propiedades espectrales características de la nieve, la cual presenta alta reflectancia en el rango visible y baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta, lo que permite diferenciarla de otros elementos del paisaje como suelos, vegetación o cuerpos de agua (Gascoin et al., 2020).

8.15. Falso Color

El procesamiento de imágenes satelitales constituye una técnica científicamente validada para mejorar la discriminación espectral de cobertura superficiales. Diversos estudios han demostrado que la reasignación de bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) a los canales visibles (RGB) permite resaltar contrastes que no son perceptibles en imágenes de color natural (Nafigin et al., 2022).

Desde el funcionamiento físico, cada material presenta una firma espectral particular derivada en la interacción entre la radiación electromagnética y sus propiedades estructurales y químicas. En ambientes glaciares, la nieve y el hielo muestran alta reflectancia en el visible y el NIR, pero presentan fuerte absorción en el SWIR, lo que genera un contraste marcado frente a rocas volcánicas y suelos expuestos. Esta diferencia espectral es la base científica que justifica el uso de combinaciones como:

- SWIR-NIR-ROJO (7-5-4 en Landsat 8)
- NIR-ROJO-VERDE (5-4-3 en Landsat 8)

En estudios de glaciares, estas composiciones permiten delimitar con mayor precisión:

- Hielo limpio
- Nieve reciente
- Zonas de ablación

La aplicación de falso color no solo mejora la interpretación visual, sino que optimiza procesos posteriores como la clasificación supervisada y el cálculo de índices espectrales (por ejemplo, NDSI), reduce errores por sombras topográficas o mezcla espectral. Además, cuando se combina métodos estadísticos de realce espectral, incrementa la sensibilidad para detectar cambios espaciales y temporales en la cobertura glaciar (Prieto-Amparan et al., 2018).

8.16. Evaluación multitemporal

Un análisis multitemporal es una técnica utilizada en la interpretación de imágenes de satélite para estudiar cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Se utilizan imágenes de diferentes fechas para comparar y analizar los cambios en la vegetación, la urbanización, la degradación del suelo, entre otros aspectos. Los datos recolectados en estos análisis son utilizados para monitorear y manejar de manera efectiva los recursos naturales y para tomar decisiones en la planificación urbana y en la gestión ambiental (Fu et al., 2024).

8.17. Función de la evaluación Multitemporal

Su función central es convertir la comparación "antes – después – tendencia" en métricas: delimitar clases o coberturas por año, periodo y así también como identificar el glaciar y su perdida, cuantificar superficies y luego estimar magnitud, dirección y ritmo del cambio, (perdida, ganancia, tasas anuales, transiciones entre clases). Esto se usa como diagnóstico para entender que está ocurriendo en un área y sustentar medidas de manejo, restauración y planificación (Coronel Castro, 2022).

8.18. Índice Kappa

Constituye uno de los indicadores más utilizados para la evaluación de la exactitud en clasificaciones derivadas de imagen de teledetección, debido a que permiten cuantificar el grado de concordancia entre los resultados de clasificación y los datos de referencia, considerando la probabilidad de coincidencia aleatoria. Este coeficiente se calcula a partir de la matriz de confusión y proporciona una medida estadística que integra tanto los errores de omisión como de comisión en un único valor cuantitativo, lo que facilita la comparación entre diferentes métodos de clasificación (Feizizadeh et al., 2022).

8.19. Método Mann-Kendall

Es un aprueba estadística no paramétrica ampliamente utilizada para detectar tendencias monotónicas en series temporales ambientales, especialmente en estudios climáticos e

hidrológicos (Mann, 1945). Su principal fortaleza radica en que no requiere que los datos sigan una distribución normal, lo que lo hace particularmente adecuado para variables como temperatura, precipitación o radiación solar, cuyos registros sueles presentar variabilidad interanual y valores extremos.

El estadístico S del test evalúa la dirección de la tendencia comparando cada dato con los valores posteriores en la serie temporal. Posteriormente, se calcula el estadístico Z estandarizado, el cual permite determinar si la tendencia es:

- Positivo ($Z > 0$) = Tendencia creciente
- Negativa ($Z < 0$) = Tendencia decreciente

En estudios glaciares, el método Mann-Kendall es científicamente pertinente porque permite identificar tendencias sostenidas en variables climáticas que influyen directamente en el balance de mase glaciar.

8.20. Método de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida estadística paramétrica utilizada para cuantificar la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas continuas (Pan et al., 2024). El coeficiente de Pearson evalúa el grado en que dos variables que varían de manera proporcional respecto a sus medidas, proporcionando un indicador estandarizado que cambia entre -1 y +1.

Valores cercanos a +1 indican una asociación lineal positiva fuerte; valores cercanos a -1 reflejan una relación lineal negativa fuerte; y valores próximos a 0 indican ausencia de relación lineal significativa.

9. PREGUNTA CIENTÍFICA

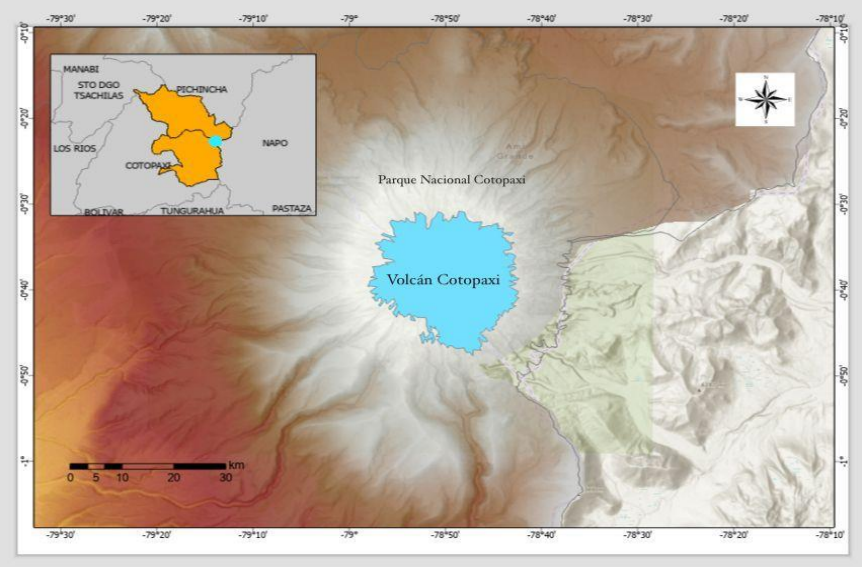
¿Cómo ha variado la cobertura glaciar del Volcán Cotopaxi en los 30 años según el análisis de imágenes satelitales y cuál es el impacto del cambio climático?

10. AREA DE ESTUDIO

El Volcán Cotopaxi se localiza en las coordenadas geográficas 0°38´S y 78°26´W con una altitud máxima de 5.897 msnm (Gonzalez-Urango et al., 2025). La cobertura glaciar se desarrolla en las zonas más elevadas por encima de los 4.800 msnm donde se mantiene un casquete de hielo permanente. Este glaciar se distribuye de forma circular alrededor del cráter, adaptándose a la forma del volcán con temperaturas medias anuales entre -2°C y 8°C, alta radiación solar y precipitaciones que oscilan entre 1,000 y 1,500 mm/año. (Duran Macias, 2021).

Figura 1

Ubicación del volcán Cotopaxi



11. METODOLOGÍA

11.1. Tipo de investigación y enfoque de investigación

11.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada ya que, se orienta a generar conocimiento que permita comprender y resolver problemas concretos relacionados con el ambiente y el cambio climático (Paul *et al*., 2016). Este trabajo presenta ese tipo de investigación, debido a que se emplearon técnicas de teledetección y análisis geoespacial para abordar un problema ambiental concreto: el retroceso glaciar en el Cotopaxi entre 1995 y 2025. La aplicación de estas herramientas permite no solo cuantificar y visualizar los cambios en la superficie glaciar, sino también generar información clave para comprender las implicaciones del cambio climático en los ecosistemas andinos.

11.1.2. Enfoque de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en el análisis de datos numéricos obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales y del cálculo de índices espectrales que permiten identificar la presencia de nieve y hielo.

El enfoque cuantitativo permite medir y analizar cambios espaciales y temporales en la superficie glaciar mediante herramientas matemáticas, estadísticas y geoespaciales. En estudios glaciológicos, este enfoque es ampliamente utilizado para evaluar la evolución de los glaciares a partir de datos satelitales y series temporales de información ambiental (Paul et al., 2016).

11.2. Métodos

11.2.1. Método de análisis multitemporal

Se aplicó el método de análisis multitemporal, el cual consiste en comparar imágenes satelitales de diferentes años para identificar cambios en la cobertura glaciar. Este método permite evaluar la evolución espacial de los glaciares y cuantificar su pérdida de superficie a lo

largo del tiempo (Dioses Cardenas, 2017). Este tipo de análisis es ampliamente utilizado en estudios glaciológicos para monitorear el retroceso glaciar mediante índices espectrales.

El estudio se apoyó en el método de análisis multitemporal, el cual se basa en la comparación de imágenes satelitales obtenidas en distintos años con el fin de identificar variaciones en la cobertura glaciar.

11.2.2. Método de teledetección

El método de teledetección facilita la identificación de nieve y hielo mediante la respuesta espectral registrada en las bandas del espectro electromagnético, permitiendo calcular índices como el NDSI, ampliamente empleado para detectar cobertura glaciar (Calderon Hernandez & Mora Pérez, 2022).

La utilización de método de teledetección en la investigación permitió obtener información de la superficie terrestre sin contacto directo mediante sensores satelitales. También ayuda al monitoreo de glaciares permitiendo analizar su evolución espacial y temporal, siendo una herramienta fundamental para estudios de cambio climático en regiones de montaña.

11.2.3. Método Estadístico

Los métodos estadísticos permiten evaluar cambios en series temporales ambientales y determinar si los cambios observados presentan una tendencia significativa (Huacani Calsin, 2019). Para el análisis de los resultados se aplicaron métodos estadísticos métodos estadísticos que permiten identificar tendencias y relaciones entre variables, entre ellos se aplicaron, prueba de tendencia Mann-Kendall, para evaluar la tendencia temporal del retroceso glaciar y el coeficiente de correlación de Pearson, para determinar la relación entre variables analizadas.

11.3. Técnicas e Instrumentos

11.3.1. Técnicas

11.3.1.1. Obtención de imágenes satelitales a partir de la plataforma de teledetección Landsat

Este proceso permitió disponer de un conjunto de imágenes satelitales adecuadas para el análisis multitemporal de la cobertura glaciar del volcán Cotopaxi. Para ello, se seleccionaron escenas del programa Landsat correspondientes al periodo 1995–2025, priorizando aquellas que presentaban baja presencia de nubosidad y una adecuada calidad radiométrica y geométrica. Posteriormente, las imágenes fueron organizadas según su fecha de adquisición y tipo de sensor, lo que permitió mantener consistencia temporal y espacial durante el procesamiento. Esta selección facilitó su integración en el entorno SIG y el posterior análisis espectral mediante índices glaciológicos. De esta manera, las escenas seleccionadas constituyeron la base de datos satelital principal utilizada para el procesamiento de imágenes, el cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) y el análisis multitemporal del retroceso glaciar del volcán Cotopaxi (Calderon Hernandez & Mora Pérez, 2022).

11.3.1.2. Corrección radiométrica

Este procedimiento permite mejorar la calidad espectral de las imágenes satelitales antes de su análisis, reduciendo los efectos de la atmósfera y garantizando valores de reflectancia más precisos para la interpretación de la superficie terrestre. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales acompañadas de su archivo Metadata (MTL), el cual contiene información necesaria para el procesamiento radiométrico de las bandas espectrales. Inicialmente, las imágenes presentaban una composición RGB en infrarrojo, por lo que antes de ser cargadas en el software ENVI se transformaron a RGB de color verdadero para facilitar su interpretación. Posteriormente, se delimitó el área de interés correspondiente al glaciar del volcán Cotopaxi mediante la herramienta Region of Interest (ROI) Tool. A continuación, se aplicó la calibración

radiométrica a través de la ruta Toolbox – Radiometric Calibration – ROI Selection, ajustando parámetros como el tipo de calibración y el factor de escala para convertir los valores digitales de los píxeles en valores de reflectancia. Finalmente, se realizó una corrección atmosférica mediante Apply FLAASH Settings, con el objetivo de eliminar distorsiones producidas por la atmósfera en la energía electromagnética registrada por el sensor. Este proceso permitió obtener imágenes corregidas y confiables, necesarias para el cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) y la delimitación de la cobertura glaciar durante el periodo 1995–2025 (Paul et al., 2016). (ver Anexo 2 Correcciones radiométricas de las imágenes descargadas de Landsat).

11.3.1.3. Análisis de índices espectrales

El índice Normalized Difference Snow Index (NDSI), permite diferenciar superficies cubiertas por nieve o hielo de otros tipos de cobertura terrestre. Este índice se calcula mediante la relación entre las bandas espectrales verde e infrarrojo de onda corta. (Velez et al., 2018). En la presente investigación se utilizó el NDSI para identificar la cobertura de nieve y hielo en las imágenes satelitales, utilizando la siguiente formula.

$$\boldsymbol{NDSI} = \frac{\boldsymbol{Banda\ verde} - \boldsymbol{Banda\ azul}}{\boldsymbol{Banda\ verde} + \boldsymbol{Banda\ azul}}$$

11.3.1.4. Cálculo de tasas de cambio anual

Para determinar el ritmo de retroceso glaciar se calculó la tasa anual de pérdida de superficie glaciar mediante (Cabrera Montenegro & Vega Tamba, 2022):

$$\boldsymbol{Tasa} = \frac{\boldsymbol{A_{final}} - \boldsymbol{A_{inicial}}}{\boldsymbol{n}}$$

Donde

- A_{final} = área glaciar final
- $A_{inicial}$ = área glaciar inicial
- n = número de años

11.3.1.5. Evaluación de precisión mediante índice Kappa

Este índice permite evaluar la calidad de las clasificaciones obtenidas a partir de imágenes satelitales (Cabrera Montenegro & Vega Tamba, 2022). La precisión de la clasificación de la cobertura glaciar se evaluó mediante el índice Kappa, el cual mide el grado de concordancia entre la clasificación obtenida y los datos de referencia, mediante la siguiente formula:

$$Tasa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde

- P_o = precisión observada
- P_e = precisión esperada

Se utilizó el índice Kappa con el propósito de verificar las áreas del glaciar determinadas, se empleó el análisis de coeficiente Kappa y la matriz de contingencia, para estimar el grado de exactitud de la clasificación, siendo bidimensional y mostrando la relación $n_x n$, en el que las filas representan las clases de referencia (terreno), mientras las columnas las áreas de entrenamiento (mapa temático) y de manera diagonal representa los puntos de control que coinciden con los valores de la matriz, la cuales se ajustan al uso del suelo y retroceso glaciar del Volcán Cotopaxi. l P, 2008

11.3.1.6. Análisis multitemporal de cambio de cobertura glaciar

La tasa de cambio se calculó mediante expresión matemática que relacionó la variación del área glaciar con el intervalo temporal, permitiendo evaluar la intensidad y dirección de los cambios ocurridos entre los subperíodos (2001-2005-2011-2015-2017-2021-2022-2023-2025). Este enfoque es ampliamente aplicado en estudios de dinámica de cobertura terrestre y facilita la comparación de tendencias espaciales en el tiempo, de acuerdo a la ecuación propuesta (Bocco et al., 2001).

$$N = N_0\,(1 + r)^t$$

Donde:

N_0 = Superficie de la cobertura glaciar en el tiempo inicial “0”

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

R= Tasa de cambio anual

t= Diferencia del tiempo en años

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

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

11.3.1.7. Análisis estadístico de tendencias Mann-Kendall

La prueba Mann-Kendall es un análisis para datos no paramétricos aplicando en los estudios de identificación de tendencias en series hidrometeorológicas y otras series ambientales en función del tiempo el cual ayuda a determinar los parámetros analizados aumentan o disminuyen con el pasar de los años (Wulder et al., 2019).

La aplicación de tendencias Mann-Kendall permitió sustentar la aplicación de análisis de tendencia, se determinó previamente la normalidad de series de temperatura y precipitación mediante la prueba estadística de Shapiro-Wilk, considerado un nivel de confianza de un 95%. El análisis permitió determinar la naturaleza paramétrica o no paramétrica de los datos.

La prueba estadística se aplicó a las series de datos entre la precipitación media mensual y la temperatura media mensual, que correspondió al periodo 1995- 2025. De esta manera se optó dicha prueba estadística, debido a que no es necesario la distribución normal de los datos y a la baja sensibilidad de series poco homogéneas(Tabari et al., 2011).

En la aplicación del método, es necesario organizar los valores de las variables en una secuencia ordenada $(X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n)$, con el propósito de determinar el signo de la diferencia

entre cada par de datos al comparar sus magnitudes $(X_j - X_k)$, considerando que j > k, conforme a los criterios establecidos con los siguientes datos:

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

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

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

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 resultados obtenidos durante el análisis, se determinó la varianza asociada al estadístico S del método Mann- Kendall, considerando claramente la presencia de valores repetidos, es decir, aquellos casos en lo que la diferencia entre las observaciones es nula $(X_j - X_k = 0)$. Este cálculo se realizó a partir de la expresión matemática correspondiente:

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

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

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S - 1}{\sqrt{[Var(s)]}} si > 0 \\ 0\ si\ S = 0 \\ \dfrac{S + 1}{\sqrt{[Var(S)]}} si < 0 \end{cases}$$

A partir del estadístico Z se estudió 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

Se calculó las tendencias, para los parámetros de temperatura y precipitación de valores mensuales en la Estación Cotopaxi, 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 p-value inferior a 0.05 o nivel de significancia del 95% garantizando en que la hipótesis tiene altas garantías de autenticidad(Giaccone et al., 2015).

Siendo resultado Z positivo e igual o mayor que 1.96, lo que representó 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, es decir, tendencia significativa decreciente y si el valor Z es mayor a -1.96 indica tendencia no significativa decreciente Tabla 3 (Alves & Nóbrega, 2017).

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: (Alves & Nóbrega, 2017)

11.3.1.8. Análisis de correlación de Pearson

Se evaluó la distribución de los datos para verificar la normalidad, aplicando el análisis de correlación de Pearson, según los niveles de significancia, se estableció la correlación directa o inversamente proporcional entre las variables (Janse et al., 2021).

A la par, se empleó un modelo de regresión cuadrática el cual mostró el porcentaje de variabilidad de los valores y así, poder obtener la relación entre las tendencias de variabilidad climática identificadas mediante la prueba de Mann-Kendall y el retroceso glaciar. Este procedimiento permitió corroborar, sí las tendencias climáticas constituyen uno de los factores que revelan la disminución de la cobertura glaciar del Volcán Cotopaxi.

Tabla 4.

Rango de valor 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: (Janse et al., 2021)

11.3.2. Instrumentos

11.3.2.1. Imágenes satelitales multitemporales

En el presente estudio se utilizaron imágenes satelitales correspondientes a diferentes años del periodo de análisis (1995-2025), con el objetivo de realizar un análisis multitemporal de la cobertura glaciar del volcán Cotopaxi, permitiendo identificar cambios en la extensión del glaciar y calcular las tasas de retroceso.

Las imágenes satelitales constituyen el principal instrumento de recopilación de datos en estudios de teledetección glaciar, ya que permiten observar y analizar la superficie terrestre a lo largo del tiempo sin necesidad de mediciones directas en campo (Huayaney & Cruz, 2009).

11.3.2.2. Cartografía base oficial del Ecuador

Otro instrumento utilizado en la investigación fue la cartografía base oficial del Ecuador, la cual proporciona información geográfica fundamental para delimitar el área de estudio, ubicar el volcán Cotopaxi y contextualizar espacialmente el análisis glaciar. Estos datos

permiten integrar la información obtenida mediante teledetección dentro de un entorno geoespacial estructurado, facilitando el análisis espacial del retroceso glaciar y la generación de mapas temáticos.

11.3.2.3. Datos climáticos del INAMHI

El uso de datos climáticos oficiales permite validar el análisis de tendencias y establecer relaciones estadísticas entre las condiciones climáticas y la evolución de los glaciares. Además, las instituciones meteorológicas nacionales participan activamente en el monitoreo ambiental y en el desarrollo de capacidades técnicas para el análisis de riesgos en zonas de montaña mediante herramientas de teledetección.

Para complementar el análisis del retroceso glaciar, se utilizaron datos climáticos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), los cuales permiten analizar variables climáticas que influyen en la dinámica glaciar, como:

- temperatura media anual
- precipitación
- variabilidad climática

11.4. Equipos y Herramientas

Tabla 5.

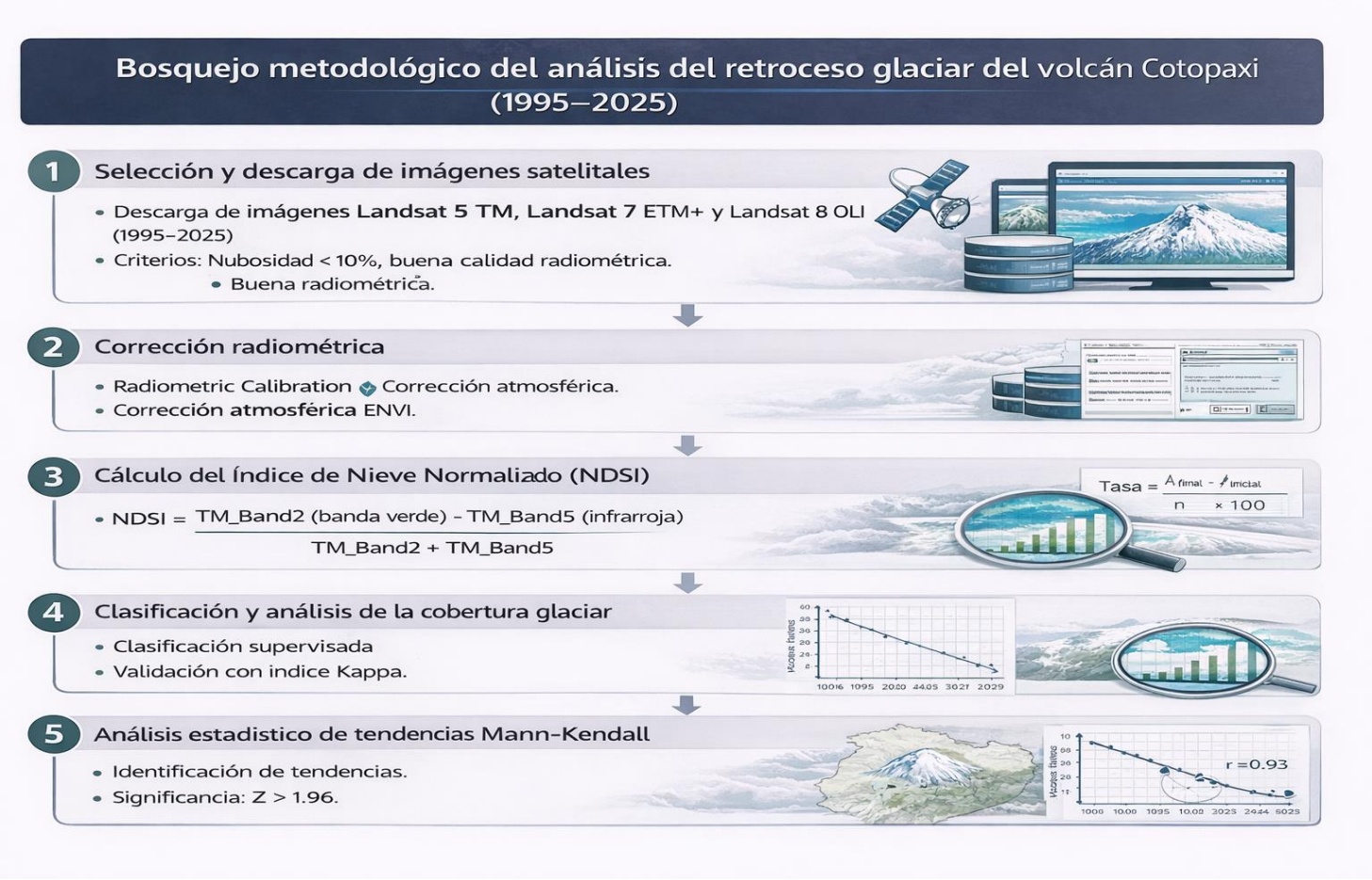
Equipos y Herramientas

Equipos	Herramientas
Computadora	ArGis
Sistema de almacenamiento digital	Google Earth
Conexión a internet para descarga de imágenes satelitales	

11.5. Diagrama metodológico

Figura 2

Diagrama Metodológico



12. COMPROBACIÓN A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

El análisis multitemporal desarrollado a partir de imágenes satelitales Landsat para el periodo 1995-2025 permitió evidenciar de manera clara que la cobertura glaciar del volcán Cotopaxi ha experimentado una disminución progresiva y sostenida en el tiempo. Los resultados muestran una pérdida acumulada del 76,92%, pasando de 26,84 km^2 en 1995 a 6,19km^2 en 2025, lo que representa una reducción total de 20,65 km^2en tres décadas.

La aplicación del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) facilito la delimitación precisa del glaciar en cada año de estudio, mientras que la delimitación precisa del glaciar en cada año de estudio, mientras que la clasificación supervisada alcanzo una precisión global del 93% y un coeficiente Kappa de 0,88, lo que confirma la alta confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto permite afirmar con seguridad que la reducción observada responde a un proceso real de retroceso glaciar y no a inconsistencias metodológicas.

La evolución histórica del glaciar demuestra que la tasa de cambio anual promedio fue de -2,57%, evidenciando un proceso constante de perdida de superficie. El periodo más crítico se registró entre 2022 y 2025(-26,03% anual), lo que refleja una aceleración reciente del retroceso. De manera particular, el año 2015 marco un punto crítico con una superficie de apenas 4,40 km^2, situación que puede explicarse por el incremento térmico, la variabilidad climática y la actividad eruptiva del volcán, cuya deposición de ceniza favoreció una mayor absorción de radiación solar y acelero el derretimiento del hielo.

El análisis estadístico complemento estos hallazgos. La prueba de Mann-Kendall confirmo una tendencia decreciente significativa en el área del glaciar, mientras que la correlación de Pearson evidencio una relación inversa entre la temperatura media y la superficie glaciar, indicando que a medida que aumenta la temperatura media y la superficie glaciar, indicando que a medida que aumenta la temperatura, disminuye el glaciar. Aunque la precipitación mostro influencia en ciertos periodos de acumulación, esta no fue suficiente para

contrarrestar la tendencia general de perdida. Así mismo, los incrementos en la radiación solar observados en años recientes contribuyeron a intensificar los procesos de ablación.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el retroceso glaciar del volcán Cotopaxi está estrechamente vinculado al aumento de la temperatura, a la variabilidad climática regional y al incremento de la radiación solar, factores asociados al cambio climático global. Este comportamiento confirma que el glaciar se encuentra en un estado de lata vulnerabilidad, con implicaciones directas sobre la regulación hídrica, la estabilidad ambiental y la gestión territorial en la región andina.

Por lo tanto, la pregunta científica queda respondida y validada, demostrando que en los últimos 30 años la cobertura glaciar del volcán Cotopaxi ha sufrido una reducción crítica y sostenida, evidenciando los efectos del cambio climático en los ecosistemas de alta montaña.

13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados alcanzados en relación con cada uno de los objetivos específicos definidos en la investigación.

13.1. Cálculo del índice de normalización diferencial de nieve (NDSI)

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) evidencian cambios interanuales importantes en la extensión glaciar del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995 – 2025. En general, se observa una tendencia de reducción progresiva de la cobertura glaciar, alcanzando un retroceso acumulado del 76,92% (20,65 km^2) respecto al año base 1995, el cual se registró una superficie glaciar de 26,84 km^2.

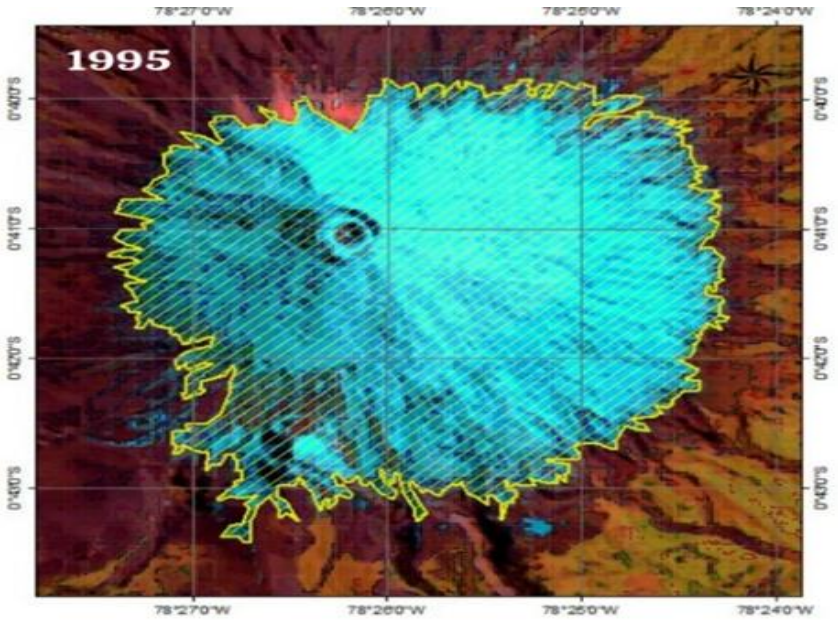
Estos resultados concuerdan con investigaciones previas realizadas en el mismo sistema glaciar, donde se ha documentado una disminución sostenida de la superficie glaciar del Cotopaxi en las últimas décadas por (Díaz Matta & Bejarano Cárdenas, 2017; Fonseca et al., 2024).

13.2. Evolución del glaciar del volcán Cotopaxi por años

Año 1995

Figura 3

Glaciar del volcán Cotopaxi 1995



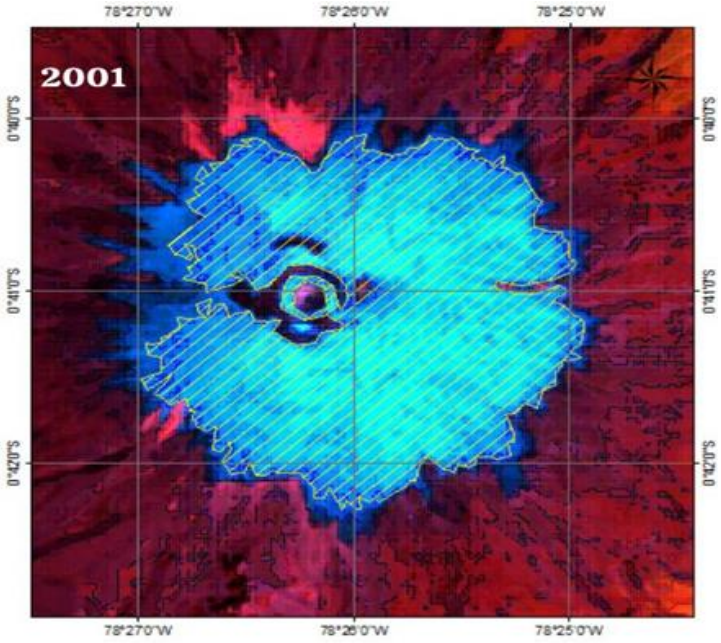
En el año 1995 se registra la mayor extensión glaciar del periodo de estudio con una superficie aproximada de 26,84 km², estableciéndose como año base para el análisis del retroceso glaciar. En la Figura 3 se observa la cobertura glaciar predominante sobre las partes superiores del edificio volcánico, evidenciando una distribución relativamente continua del hielo en la zona de cumbre y flancos superiores.

Este comportamiento es consistente con estudios previos realizados en glaciares andinos tropicales, donde se ha documentado que durante la década de 1990 los glaciares aún mantenían extensiones relativamente amplias antes de intensificarse el retroceso glaciar asociado al incremento de temperatura global Díaz Matta & Bejarano Cárdenas, 2017; Fonseca et al., 2024).

Año 2001

Figura 4

Glaciar del volcán Cotopaxi 2001



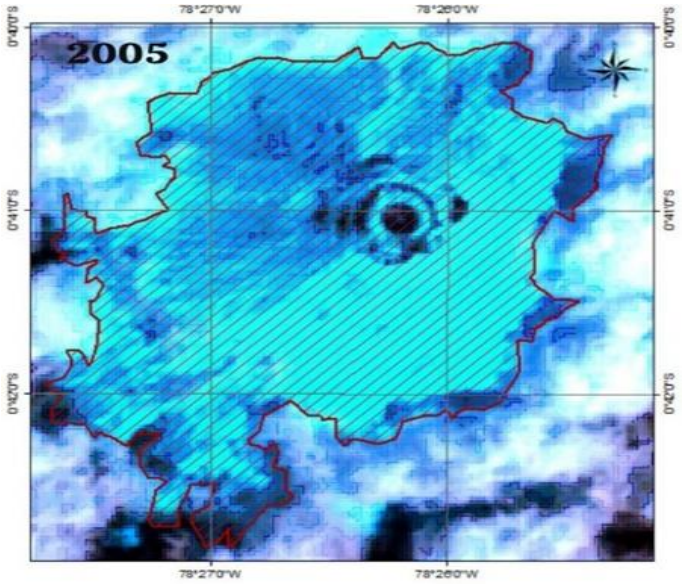
Para el año 2001 la superficie glaciar disminuye hasta 10,10 km², registrándose una pérdida de 16,74 km² respecto al año base y un retroceso glaciar del 62,35 %. En la Figura 4 se evidencia una reducción considerable del hielo en los flancos del volcán, observándose una fragmentación de la cobertura glaciar en comparación con el año 1995.

Este descenso significativo coincide con lo reportado en investigaciones sobre glaciares, donde se ha identificado que durante finales de los años noventa e inicios del siglo XXI se registró una aceleración en la pérdida de masa glaciar debido al aumento de la temperatura del aire y cambios en los patrones de precipitación Fonseca et al., 2024).

Año 2005

Figura 5

Glaciar del volcán Cotopaxi 2005



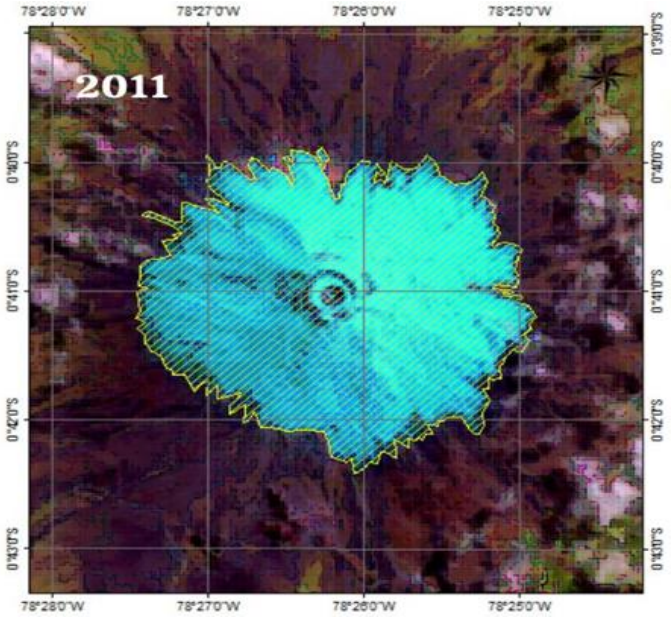
En el año 2005 se registra una superficie glaciar de 15,85 km², lo que representa una pérdida de 10,99 km² respecto al año base y un retroceso del 40,95 %. En la Figura 5 se observa una ligera expansión en la cobertura de nieve respecto al año 2001, lo cual podría estar asociado a condiciones climáticas interanuales favorables que permitieron la acumulación temporal de nieve sobre el glaciar.

Estas fluctuaciones han sido documentadas en diversos estudios sobre glaciares andinos, donde se reconoce que la extensión glaciar puede presentar variaciones temporales relacionadas con cambios en la precipitación sólida y en el balance de masa glaciar, sin que ello implique una recuperación estructural del glaciar Díaz Matta & Bejarano Cárdenas.

Año 2011

Figura 6

Glaciar del volcán Cotopaxi 2011



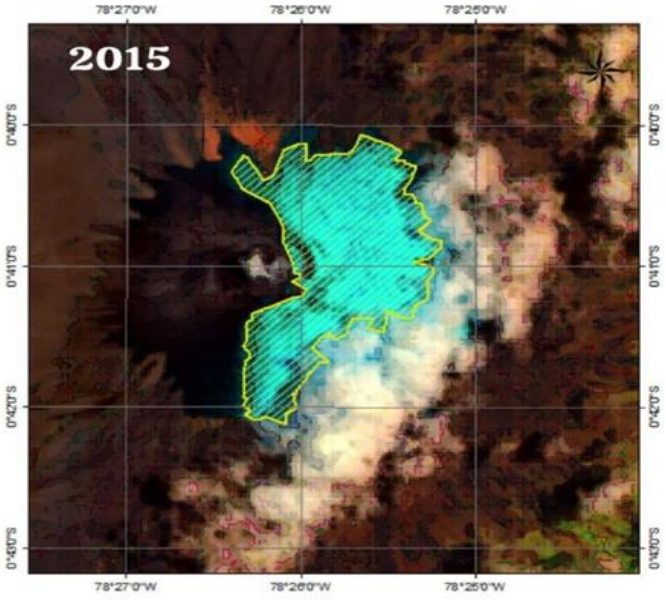
Para el año 2011 la superficie glaciar alcanza 14,90 km², evidenciando una pérdida de 11,94 km² respecto al año base y un retroceso glaciar del 44,47 %. En la Figura 6 se observa una cobertura glaciar todavía significativa en la zona superior del volcán, aunque con menor extensión que en décadas anteriores.

Este comportamiento refleja la continuidad del proceso de reducción glaciar observado en los Andes, donde diversos estudios han documentado que los glaciares de alta montaña han experimentado una disminución progresiva debido al incremento de temperatura y a la variabilidad climática regional.

Año 2015

Figura 7

Glaciar del volcán Cotopaxi 2015



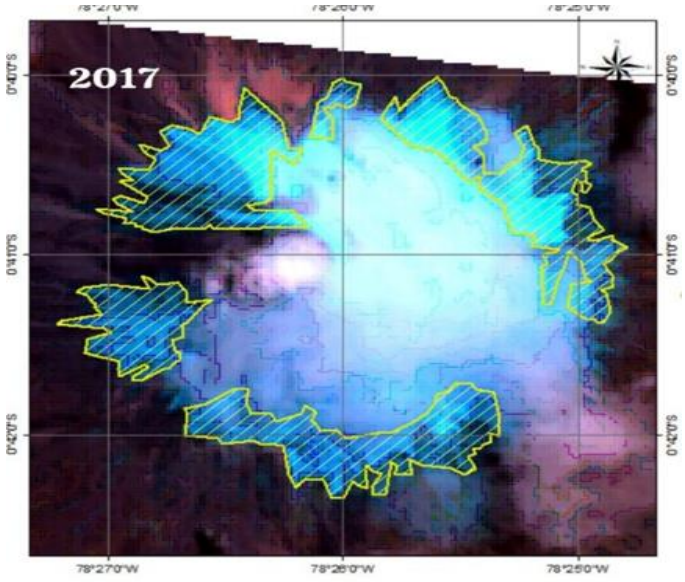
Durante el año 2015 se registra una reducción abrupta de la superficie glaciar hasta 4,40 km², lo que representa una pérdida de 22,44 km² y un retroceso del 83,60 % respecto al año base. En la Figura 7 se observa una disminución significativa del hielo, con una cobertura muy reducida en comparación con años anteriores.

Este comportamiento puede estar asociado a la reactivación eruptiva del volcán Cotopaxi en 2015, evento que generó deposición de ceniza sobre la superficie glaciar. La presencia de ceniza reduce el albedo del hielo, incrementando la absorción de radiación solar y acelerando los procesos de fusión. Además, este periodo coincidió con el evento El Niño 2015–2016, el cual produjo condiciones climáticas más cálidas en la región andina.

Año 2017

Figura 8

Glaciar del volcán Cotopaxi



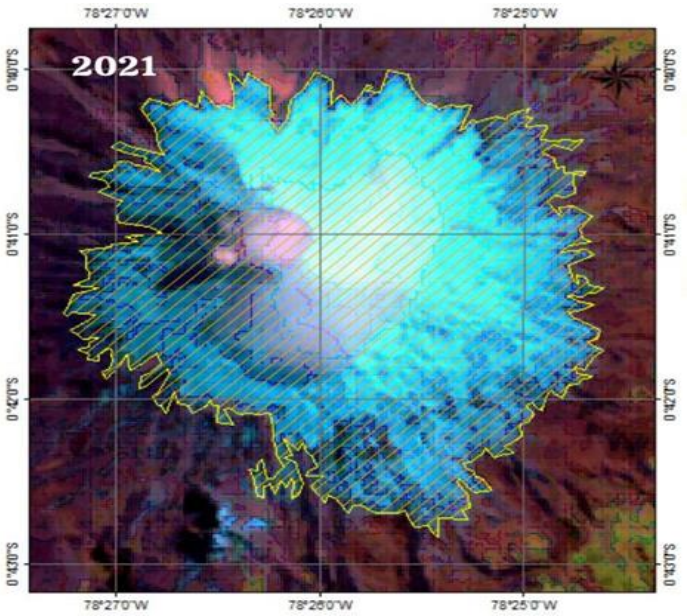
Para el año 2017 se registra una superficie glaciar de 10,50 km², equivalente a una pérdida de 16,34 km² respecto al año base y un retroceso del 60,87 %. En la Figura 8 se observa un incremento relativo en la cobertura de nieve en comparación con el año 2015.

Este aumento podría estar relacionado con procesos temporales de acumulación de nieve o variaciones climáticas interanuales, fenómeno que ha sido observado en diferentes glaciares, donde los periodos de acumulación pueden generar incrementos temporales en la superficie glaciar detectada mediante sensores remotos.

Año 2021

Figura 9

Glaciar del volcán Cotopaxi 2021



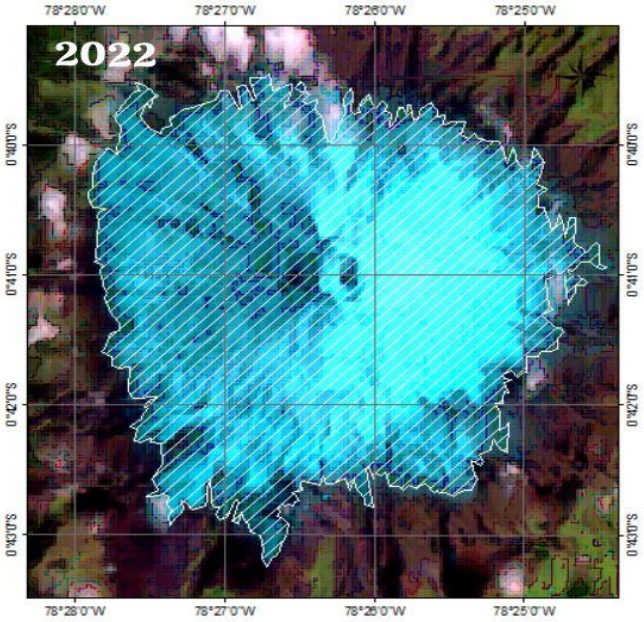
En el año 2021 se determina una superficie glaciar de 16,52 km², lo que representa una pérdida de 10,32 km² respecto al año base y un retroceso del 38,46 %. En la Figura 9 se observa una cobertura glaciar mayor en comparación con los años anteriores, lo cual podría estar asociado a condiciones climáticas favorables que favorecieron la acumulación de nieve durante determinados periodos.

Investigaciones previas han señalado que los glaciares andinos pueden presentar cambios interanuales relacionadas con cambios en la precipitación sólida y variaciones en el balance energético del glaciar Fonseca et al., 2024).

Año 2022

Figura 10

Glaciar del volcán Cotopaxi



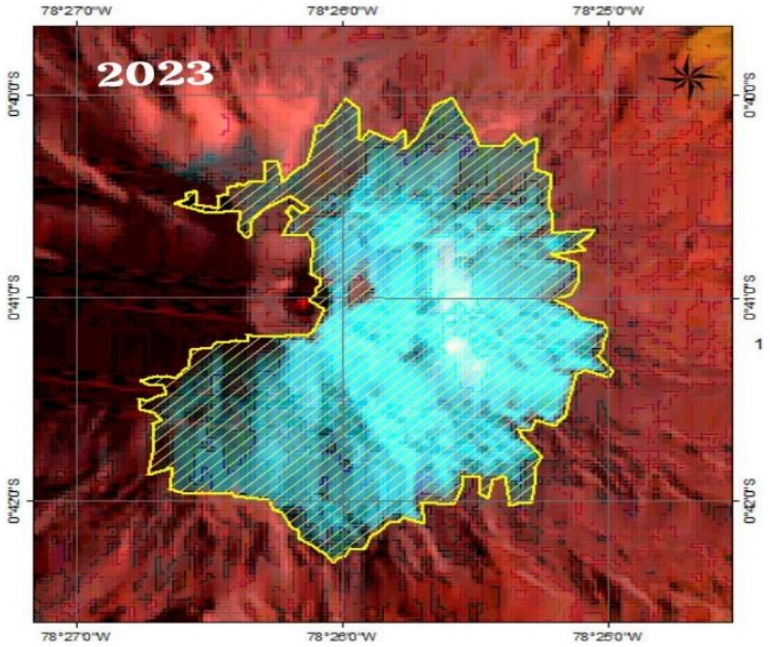
Para el año 2022 se registra una superficie glaciar estimada de 28,19 km², con una variación de −1,35 km² respecto al año base y un −5,03 %. En la Figura 3 se observa una cobertura extensa de nieve en la zona superior del volcán, evidenciando un incremento temporal en la superficie glaciar delimitada mediante el índice NDSI.

Este aumento puede asociarse a condiciones ambientales favorables registradas durante el periodo posterior a la pandemia de COVID-19, cuando la reducción temporal de actividades industriales, transporte y emisiones atmosféricas generó una disminución de contaminantes en la atmósfera. La reducción de partículas contaminantes y aerosoles favorece un mayor albedo superficial y mejores condiciones para la acumulación de nieve, lo que puede contribuir a una mayor preservación temporal de la cobertura glaciar. Sin embargo, este incremento no representa una recuperación estructural del glaciar, sino una variación interanual asociada a factores climáticos y atmosféricos temporales dentro de una tendencia general de retroceso glaciar.

Año 2023

Figura 11

Glaciar del volcán Cotopaxi 2023



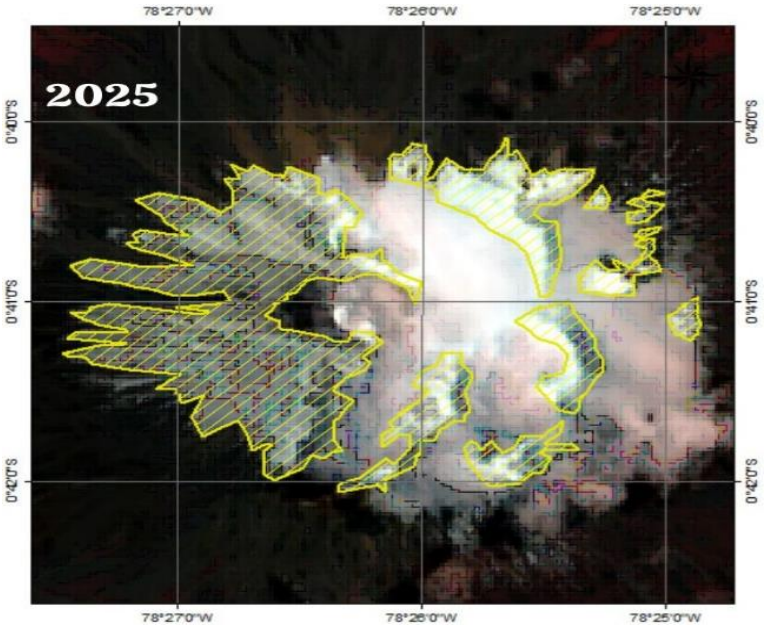
En el año 2023 la superficie glaciar disminuye nuevamente hasta 7,90 km², registrando una pérdida de 18,94 km² respecto al año base y un retroceso glaciar del 70,56 %. En la Figura 11 se observa una reducción notable en la cobertura glaciar del volcán.

Este comportamiento confirma la tendencia general de reducción del glaciar del Cotopaxi, proceso que ha sido ampliamente documentado en estudios sobre glaciares, los cuales han experimentado una pérdida acelerada de masa glaciar durante las últimas décadas.

Año 2025

Figura 12

Glaciar del volcán Cotopaxi



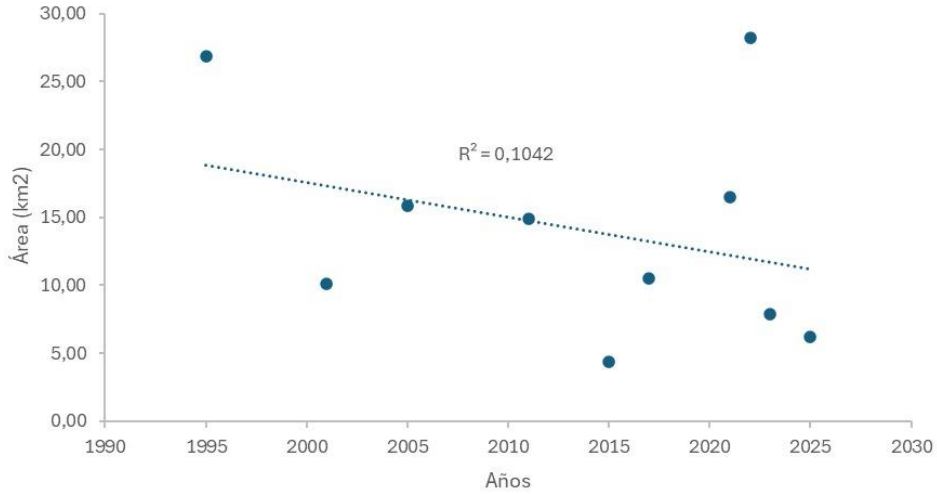
En el año 2025 se registra la menor superficie glaciar del periodo analizado con 6,19 km², lo que representa una pérdida total de 20,65 km² y un retroceso glaciar acumulado del 76,92 % respecto al año base 1995. En la Figura 12 se observa una cobertura glaciar muy reducida concentrada principalmente en la zona más alta del volcán.

Estos resultados evidencian una pérdida sostenida del sistema glaciar del volcán Cotopaxi, fenómeno que coincide con estudios previos realizados en la región andina, donde se ha documentado un retroceso significativo de los glaciares andinos debido al incremento de temperatura y a la variabilidad climática regional (Díaz Matta & Bejarano Cárdenas, 2017; Fonseca et al., 2024).

13.3. Tendencia general del retroceso glaciar

Figura 13

Gráfico de dispersión



Para analizar la tendencia temporal del retroceso glaciar se elaboró un gráfico de dispersión que relaciona la superficie glaciar con los años de estudio. En la Figura 13 se observa la variación del área glaciar durante el periodo 1995–2025, evidenciándose una tendencia general decreciente en la extensión del glaciar del volcán Cotopaxi.

Este comportamiento coincide con lo reportado en investigaciones sobre glaciares Andinos, donde se ha documentado una reducción significativa de la cobertura glaciar durante las últimas décadas debido al incremento de la temperatura del aire y a cambios en los patrones de precipitación que afectan el balance de masa glaciar.

13.4. Matriz de contingencia e índice Kappa

La evaluación de la clasificación supervisada del glaciar volcán Cotopaxi se instaura mediante la matriz de confusión de tres clases.

Tabla 6

Clasificación de tres clases

Código	Descripción
1	Glaciar
2	Roca
3	Paramo

Los resultados evidencian una exactitud global del 93% y un coeficiente Kappa de 0.889, lo que revela una concordancia casi perfecta entre la clasificación obtenida y los datos de referencia.

De forma individual, las exactitudes del productor y del usuario presentan valores elevados en todas las clases, destacándose una correcta identificación de la cobertura glaciar. En conjunto, estos resultados confirman la confiabilidad del método de clasificación supervisada con el análisis del retroceso glaciar en el Volcán Cotopaxi.

Tabla 7

Valores índice Kappa

Año	Índice Kappa
1995	0.86
2015	0.88
2025	0.88

La evaluación de la clasificación supervisada correspondiente a la imagen Landsat 8 del (01/08/2025) se realiza mediante una matriz de confusión, evidenciando una adecuada correspondencia entre la clasificación obtenida y los datos de referencia. En la clase glaciar se registra 46 pixeles clasificados, con una limitada confusión respecto a las otras clases. La categoría roca con 21 pixeles clasificados, es la categoría con mayor presencia de errores de asignación. Por su parte, la clase páramo alcanza 26 pixeles clasificados, evidenciando una identificación consistente de la cobertura. El análisis de la matriz de confusión corrobora la confiabilidad de la clasificación supervisada aplicada al estudio del glaciar para el año 2025.

Tabla 8

Matriz de contingencia de la clasificación supervisada de la imagen Landsat 2025

USUARIO	Nieve	Roca	Paramo	Total	Precisión de la predicción
Nieve	46	4	0	50	92%
Roca	1	21	0	22	95.45%
Paramo	0	2	26	28	92.85%
Total	47	27	26	100	
Precisión del usuario	97.8%	77.77%	100%		
Coeficiente Kappa			0.88		
Precisión			93%		

El coeficiente Kappa obteniendo una certeza en la clasificación supervisada correspondiente al año 2025 presenta un nivel de concordancia elevado. El valor calculado de 0.88 se ubica dentro de la categoría de acuerdo casi perfecto, lo que demuestra una alta consistencia entre los resultados representados por el software y la interpretación del análisis. En consecuencia, estos resultados respaldan la confiabilidad del procedimiento de clasificación y validan el análisis multitemporal desarrollado para los periodos estudiados.

De acuerdo con (Foody, 2020), el coeficiente kappa se deriva directamente de la matriz de confusión y constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar la exactitud de clasificaciones temáticas obtenidas mediante teledetección. El valor de kappa obtenido en el presente estudio (0.88) refleja una alta concordancia entre los datos clasificados y la información de referencia, lo que evidencia la confiabilidad del proceso de clasificación supervisada aplicado. Asimismo, la precisión global del 93% confirma que la discriminación espectral entre las coberturas analizadas fue adecuada, permitiendo considerar los resultados como válidos para estudios de análisis multitemporal y monitoreo de cambios ambientales.

13.5. Cálculo de tasa de cambio anual

La tasa de cambio anual obtenidas para el Volcán Cotopaxi muestra valores elevados negativos, evidenciando una pérdida progresiva de la cobertura glaciar a lo largo del tiempo. El período 2022-2025 registra la mayor tasa de retroceso glaciar, con un valor de -26.03 % por año. Para el período completo de análisis (1995-2025). El cambio anual obtenido del Volcán Cotopaxi (-2.57 %) indica un retroceso más acelerado en comparación con dichos antecedentes, lo que refuerza la evidencia de un proceso intensificado de retracción glaciar en sistemas de alta montaña.

Tabla 9

Tasa de cambio anual del Volcán Cotopaxi obtenidas de la clasificación supervisada

Periodo	Tasa de cambio	Tasa de cambio (1995-2025)
1995-2001	-10.39%	
2001-2005	+14.22%	
2005-2011	-1.00%	
2011-2015	+17.62%	
2015-2017	-63.32%	-2.57%
2017-2021	+14.33%	
2022-2025	-26.03%	

La investigación de (Velasco, 2024) demuestra que la tasa de cambio anual constituye un indicador clave para evaluar la dinámica del retroceso glaciar, ya que permite cuantificar la magnitud de la perdida de la superficie glaciar por año y analizar la tendencia de evolución futura del glaciar. Estudios recientes basados en el análisis multitemporal y técnicas de clasificación supervisada han reportado tasas de retroceso glaciar anual de -1.90 % de glaciares durante el periodo 2000-2024, evidenciando una disminución sostenida de la cobertura glaciar asociada a condiciones climáticas perjudiciales.

14. TENDENCIAS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SU RELACIÓN CON EL RETROCESO GLACIAR

A continuación, se exponen los resultados derivados del análisis de las tendencias climáticas, obtenidos mediante la aplicación de pruebas estadísticas. En este estudio, la caracterización de las condiciones climáticas se fundamentó en la prueba de las variables de temperatura y precipitación, razonando la representatividad espacial y la proximidad de las estaciones meteorológicas respecto al área de estudio, para un periodo de análisis de 30 años comprendiendo entre 1995-2025.

14.1. Análisis climático

De acuerdo con los datos oficiales del INAMHI de la estación meteorológica Cotopaxi, la temperatura media anual presenta una baja variabilidad durante el periodo estudiado. Los valores de desviación estándar y coeficiente de variación demuestran una dispersión reducida, lo que indica estabilidad térmica interanual y ausencia de cambios significativos en la temperatura media, condición relevante para el análisis del retroceso glaciar del volcán Cotopaxi (*INAMHI*, s. f.). El comportamiento estadístico de las variables climáticas analizadas durante el periodo de estudio se presenta en los anexos, incluyendo los resúmenes descriptivos de temperatura media, precipitación y radiación solar (Anexo 13).

A partir del análisis de los registros mensuales de precipitación, temperatura y radiación solar para el periodo de 1995-2025, se evidencia una relación directa entre la variabilidad climática y el retroceso glaciar del volcán Cotopaxi. Los datos muestran fluctuaciones interanuales en la precipitación, con valores relativamente menores entre 2001 y 2015, lo que redujo el aporte de nieve necesario para la acumulación glaciar y favoreció un balance de masa negativo. Paralelamente, la temperatura media presenta una tendencia general al incremento, con picos notorios en 2015, 2022 y 2023, intensificando los procesos del derretimiento del hielo, especialmente en un glaciar Andino altamente sensible a variaciones térmicas. La

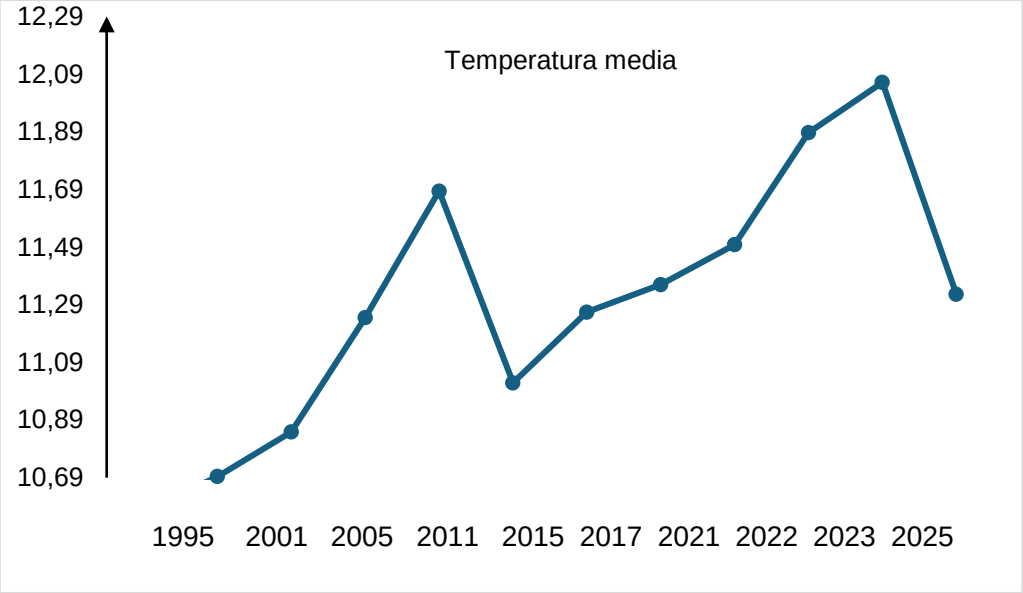
radiación solar también registra valores elevados en los años de mayor pérdida glaciar, aumentando la energía disponible para la fusión; este efecto se intensifico en 2015 debido a la actividad eruptiva del volcán Cotopaxi, donde la deposición de ceniza redujo el albedo superficial y acelero el derretimiento del hielo. En conjunto, la disminución de la precipitación, el incremento de la temperatura y los altos niveles de radiación solar constituyen factores climáticos determinantes que explican las fases de mayor retroceso glaciar observadas durante el periodo de estudio.

14.2. Análisis estadístico de tendencias Mann-Kendall

El análisis de tendencia mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall permitió evaluar la existencia de cambios monotónicos en las series mensuales de temperatura media y precipitación durante el periodo de estudio. Esta prueba es adecuada para variables hidro climáticas debido a que no requiere que los datos sigan una distribución normal y es poco sensible a valores extremos.

Figura 14

Gráfico de tendencia de temperatura media



Los resultados obtenidos muestran un estadístico S positivo (S = 46) y un valor estandarizado Z= 3.22, el cual es mayor que el valor crítico de la distribución normal para un

nivel de significancia de 0.05 (Z critico = 1.96 ±). Esto indica la presencia de una tendencia significativa creciente en la temperatura media mensual. Los valores más elevados de temperatura media se concentran hacia los meses intermedios del año, destacándose picos en mayo y junio, lo cual sugiere un incremento progresivo de la temperatura conforme avanza el ciclo anual. Estos picos refuerzan el comportamiento ascendente identificado por la prueba estadística, evidenciando un posible proceso de calentamiento en la zona de estudio.

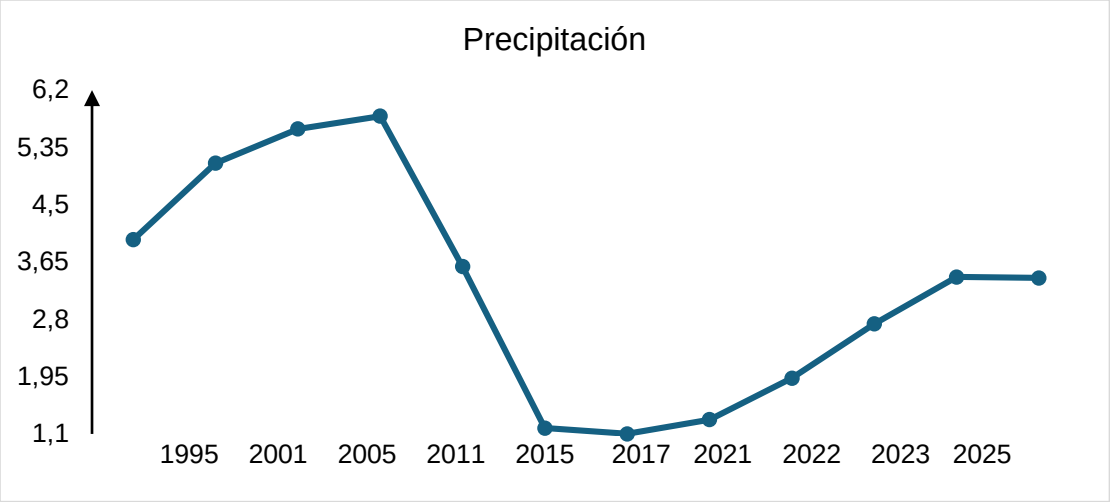
La presencia de una tendencia significativa positiva es consistente con los procesos asociados al cambio climático, donde se ha reportado un incremento gradual de la temperatura en regiones de alta montaña.

14.3. Análisis de Tendencia de precipitación Mann Kendall

Mediante el análisis estadístico de Mann-Kendall mostro un S negativo (S = -16) y un valor Z=-1.17, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación ($|Z| < 1.96$). Por lo tanto, no se evidencia una tendencia estadísticamente significativa en la precipitación durante el periodo analizado. Sin embargo, se identifican fluctuaciones mensuales con picos de precipitación principalmente en marzo y abril, lo cual coinciden con la estacionalidad típica de la región andina ecuatorial, caracterizada por periodos lluviosos bien definidos. Estas variaciones indican una alta variabilidad intermensual más que un cambio sistemático en el tiempo.

Figura 15

Gráfico de tendencia de precipitación

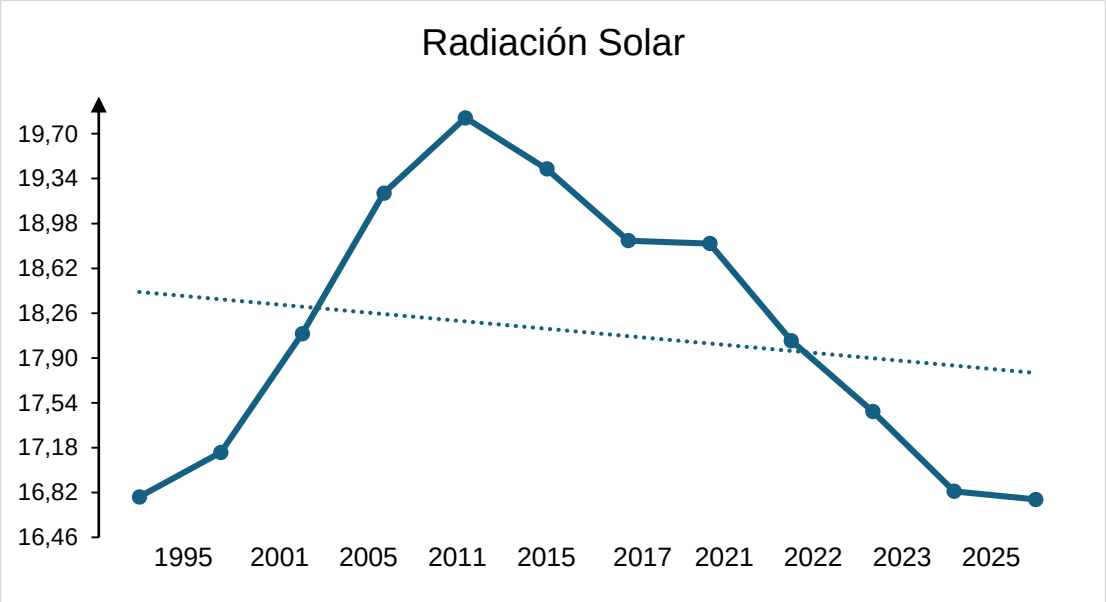


14.4. Análisis de Tendencia de Radiación solar Mann Kendall

El análisis de tendencia mediante el test no para métrico de Mann-Kendall aplicado a los datos de radiación solar durante el periodo 1995-2025 evidencia una tendencia ligeramente creciente, con variaciones interanuales moderadas en los valores registrados. Los promedios anuales de radiación solar oscilan aproximadamente entre 18,78 y 19,83 MJ/m2/día, lo que indica un incremento progresivo de la energía incidente sobre la superficie glaciar del volcán Cotopaxi a lo largo del tiempo.

Figura 16

Gráfico de tendencia de Radiación solar



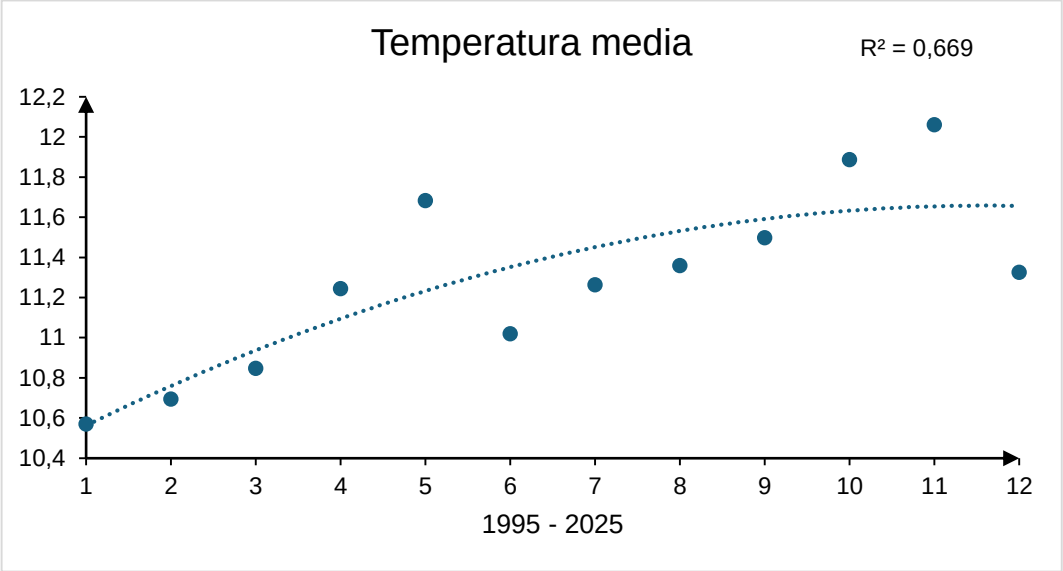
Los picos identificados en la prueba coinciden principalmente con los años 2015, 2017, 2022 y 2023, los cuales corresponden a periodos donde se registraron pérdidas importantes de superficie glaciar. Este comportamiento sugiere que el aumento de la radiación solar contribuyó a intensificar los procesos de ablación del hielo al incrementar la energía disponible para la fusión. El año 2015 representa un punto particularmente crítico, ya que la mayor radiación solar coincidió con la actividad eruptiva del volcán Cotopaxi, lo que genero disposición de ceniza sobre la superficie glaciar.

14.5. Análisis de correlación de Pearson

Los gráficos corresponden a diagramas de dispersión empleados para evaluar el grado y sentido de la relación lineal entre las variables climáticas y el retroceso glaciar, a través del coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual permite identificar relaciones directas, inversas o nulas m considerando su magnitud y significancia estadística.

Figura 17

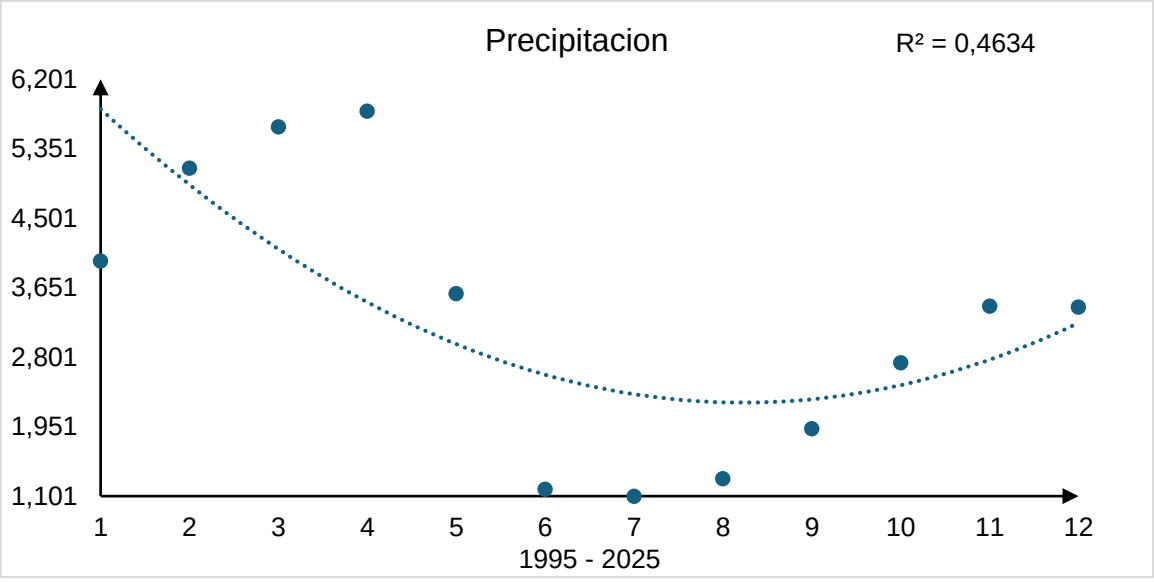
Análisis de la temperatura media mediante la correlación de Pearson



El coeficiente de correlación obtenido fue r 0.7837, lo cual indica una correlación positiva fuerte entre la temperatura media y el tiempo. Este resultado confirma lo observado en la prueba de Mann-Kendall, evidenciando un incremento progresivo de la temperatura a lo largo del periodo 1995-2025.

Figura 18

Análisis de la Precipitación mediante la correlación de Pearson

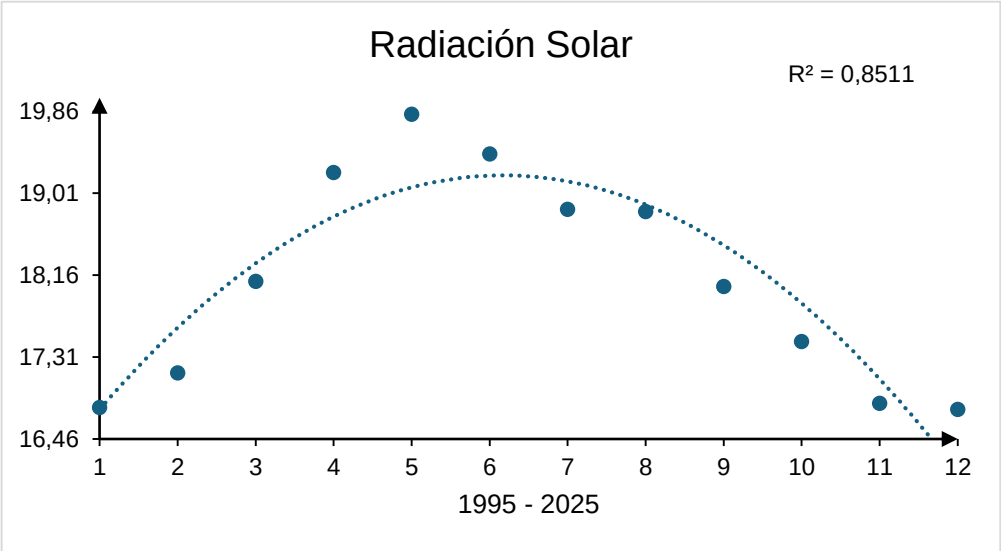


Para la precipitación se obtuvo un coeficiente r = -0.5103, lo cual representa una correlación negativa moderada. Esto indica una ligera tendencia decreciente en los valores de precipitación con el tiempo; sin embargo, dicha relación no es lo suficientemente fuerte como para considerarse determinante, lo cual coincide con los resultados no significativos de la prueba de Mann-Kendall.

Este comportamiento refleja que la precipitación presenta mayor variabilidad y menor estabilidad temporal en comparación con la temperatura, característica común en variables hidrológicas influenciadas por múltiples factores atmosféricos

Figura 19

Análisis de la radiación solar mediante la correlación de Pearson



El análisis de correlación de Pearson entre la radiación solar y la superficie glaciar muestra un coeficiente aproximado de r = -0,192839, lo que indica la existencia de una correlación negativa débil entre ambas variables. Este resultado significa que a medida que la radiación aumenta, la superficie glaciar tiene a disminuir.

Los años con mayores valores de radiación solar, particularmente 2015,2017,2022,2023, coinciden con periodos de mayor reducción glaciar, lo que evidencia que la radiación solar

actúa como un factor energético complementario que intensifica la fusión del hielo cuando se combina con temperaturas elevadas y condiciones de menor precipitación. La radiación solar contribuye al retroceso glaciar principalmente mediante el incremento de la energía disponible para los procesos del retroceso, especialmente cuando la superficie presenta menor reflectividad debido a disposición de ceniza o reducción de nieve fresca.

15. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

15.1. Conclusiones

El análisis multitemporal mediante imágenes satelitales Landsat y técnicas de clasificación supervisada permitió evidenciar un retroceso glaciar sostenido y significativo del volcán Cotopaxi durante el periodo 1995-2025 registrándose una pérdida acumulada del 76,92% de la cobertura glaciar, lo que confirma un proceso de disminución acelerada en sistemas glaciares de alta montaña.

La validad de la clasificación supervisada a través del coeficiente Kappa (0,88 para el año 2025) demostró una alta concordancia entre los resultados generados por el software y la interpretación del analista, lo que respalda la confiabilidad metodológica del estudio y la solides de los productos cartográficos, obtenidos para el análisis del retroceso glaciar.

El análisis estadístico de las variables climáticas evidencio una tendencia al incremento de la temperatura media y una disminución progresiva de la precipitación, comportamiento que muestra una relación inversa con la cobertura glaciar, confirmando que la variabilidad climática constituye uno de los factores determinantes en la aceleración del retroceso glaciar del volcán Cotopaxi.

15.2. Recomendaciones

Fortalecer el monitoreo continuo del glaciar volcán Cotopaxi mediante el uso integrado de imágenes satelitales de mayor resolución espacial y temporal, combinadas con sensores

ópticos y radar, a fin de reducir las limitaciones asociadas a la nubosidad y mejorar la precisión en la delimitación de superficies glaciares fragmentadas.

Ampliar el análisis climático incorporando series temporales más densas y variables complementarias, como radiación solar, humedad relativa y cobertura nival, que permitan comprender de manera más integral la interacción entre los factores climáticos y la dinámica glaciar en escenarios de cambio climático.

Los resultados obtenidos en la presente investigación sean incorporados como insumo técnico en los procesos de planificación ambiental, gestión integral del recurso hídrico y formulación de estrategias de adaptación al cambio climático en el área de influencia del Parque Nacional Cotopaxi, a fin de fortalecer la toma de decisiones institucionales y apoyar la implementación de medidas de manejo y conservación sustentada en evidencia científica.

16. BIBLIOGRAFÍA

Alves, K. M. A. da S., & Nóbrega, R. S. (2017). Tendencia Pluviometrica Y Concentración Estacional De Precipitación En La Cuenca Hidrográfica Del Río Moxotó – Pernamcuco – Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, *1*(58), 295-313.

Baño Espinoza, T. E., & Heredia Páez, E. D. (2021). *Análisis multitemporal de cambios en la cubierta vegetal mediante el uso de imágenes satelitales en los páramos de Zumbahua provincia de Cotopaxi en el período 2020-2021.* http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11226

Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (44), 18-36.

Brito Chasiluisa, C. E. (2014). *Análisis espacial y temporal de la variación de cobertura nivo-glaciar en el nevado Cayambe mediante imágenes satelitales Landsat y Sistemas de*

Información Geográfica (SIG) [bachelorThesis, Quito, 2014.]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8837

Cabrera Montenegro, E. B., & Vega Tamba, J. C. (2022). *Análisis del retroceso glaciar en los Andes del Norte del Ecuador durante un período de 30 años empleando teledetección* [bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte]. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12024

Calderon Hernandez, J. J., & Mora Pérez, W. (2022). Modelado por teledetección entre 2013 y 2021 del retroceso glaciar como consecuencia del cambio climático en la Cordillera Vilcabamba. *Repositorio Institucional - UCV*. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/100467

Cárdenas Tamayo, J. V. (2022). *Estudio de los Lahares Secundarios de la Quebrada Jatabamba (Volcán Cotopaxi) mediante Datos Sísmicos y Pluviométricos* [bachelorThesis, Quito : EPN, 2022]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22848

Chen, Y., He, B., Jiang, X., Yisilayili, G., & Zhang, Z. (2025). Examining Glacier Changes Since 1990 and Predicting Future Changes in the Turpan–Hami Area, Eastern Tianshan Mountains (China), Until the End of the 21st Century. *Sustainability*, *17*(11), 5093. https://doi.org/10.3390/su17115093

Coronel Castro, R. M. (2022). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo en el área de influencia de la carretera Gualaceo – Plan de Milagro en el periodo 2013-2020 para la definición de zonas prioritarias de restauración ecológica* [masterThesis]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24029

Crespo Solís, V. Y. (2025). *Cambios morfológicos en las cumbres de los volcanes Cotopaxi y El Reventador: Relación con su actividad eruptiva reciente.* https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26266

Diaz Cordero, G. (2012, junio). EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Ciencia y Sociedad*, *XXXVII*(2), 227-240.

Diaz, F. A. Q., & Calla, J. C. (2025). *Retroceso de glaciares y su impacto en las fuentes de agua*. LatArXiv. https://doi.org/10.62059/LatArXiv.preprints.456

Díaz Matta, V., & Bejarano Cárdenas, F. E. (2017). *Análisis multitemporal del retroceso glaciar del Volcán Nevado Cotopaxi—Ecuador entre los años 1998, 2007 y 2016*. https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1426

Dioses Cardenas, A. (2017). *Dinámica de la cobertura glaciar del nevado Huascarán y de las lagunas glaciares adyacentes entre 1990 y el 2017 mediante la teledetección*.

Duran Macias, P. W. (2021). *Los mamíferos y el turismo de naturaleza en el Parque Nacional Cotopaxi, 2020*. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/10148

Earth Science Data Systems, N. (2024, septiembre 23). *Glacier Power: What is a Glacier? | NASA Earthdata* [Basic page]. Earth Science Data Systems, NASA. https://www.earthdata.nasa.gov/topics/cryosphere/glaciers/glacier-power/what-is-glacier

Fang, C., Zhu, R., Yin, Z., Chen, Z., Shan, J., Wang, L., & Yang, H. (2024). Remote sensing monitoring of glacier area and volume changes in glacier-fed mountainous watershed on the Northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(10), 966. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13130-y

Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., & Lakes, T. (2022). QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. *Sensors*, *22*(12), 4506. https://doi.org/10.3390/s22124506

Fonseca, K., Acero Triana, J. S., Ramírez, M., Martínez, W., Ilbay, M., Espitia-Sarmiento, E., & Breuer, L. (2024). Assessing the potential of nature-based solutions as sustainable

land and water management strategies in the high tropical Andean páramo ecosystem. *Journal of Environmental Management*, *372*, 123350. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123350

Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, *239*, 111630. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630

Fountain, A. G., Iv, H. J. B., & Niebuhr, S. (2016). Glaciers in equilibrium, McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journal of Glaciology*, *62*(235), 976-989. https://doi.org/10.1017/jog.2016.86

Fu, Y., Zhu, Z., Liu, L., Zhan, W., He, T., Shen, H., Zhao, J., Liu, Y., Zhang, H., Liu, Z., Xue, Y., & Ao, Z. (2024). Remote Sensing Time Series Analysis: A Review of Data and Applications. *Journal of Remote Sensing*, *4*, 0285. https://doi.org/10.34133/remotesensing.0285

Gascoin, S., Barrou, Z., & Deschamps, C. (2020). *Estimating Fractional Snow Cover in Open Terrain from Sentinel-2 Using the Normalized Difference Snow Index*. https://doi.org/10.3390/rs12182904

Gelman Constantin, J., Ruiz, L., Villarosa, G., Outes, V., Bajano, F. N., He, C., Bajano, H., & Dawidowski, L. (2020). Measurements and modeling of snow albedo at Alerce Glacier, Argentina: Effects of volcanic ash, snow grain size, and cloudiness. *The Cryosphere*, *14*(12), 4581-4601. https://doi.org/10.5194/tc-14-4581-2020

Giaccone, E., Colombo, N., Acquaotta, F., Paro, L., & 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. https://doi.org/10.1016/S0187-6236(15)30004-7

Gonzalez-Urango, H., Ligardo-Herrera, I., Jacome-Enriquez, W., & Gómez-Navarro, T. (2025). Designing participatory planning processes for protected areas, promoting the social and economic development of the stakeholders involved: The case of Cotopaxi National Park (PNC) in Ecuador. *Regional Environmental Change*, *25*(2), 55. https://doi.org/10.1007/s10113-025-02376-y

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences*, *202*, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Gualco, L. F., Maisincho, L., Villacís, M., Campozano, L., Favier, V., Ruiz-Hernández, J.-C., & Condom, T. (2022). Assessing the Contribution of Glacier Melt to Discharge in the Tropics: The Case of Study of the Antisana Glacier 12 in Ecuador. *Frontiers in Earth Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/feart.2022.732635

Huacani Calsin, W. (2019). *Aplicación de la teledetección en la desglaciación del nevado del ampay relacionado al cambio climático entre 1980—2015*. https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/handle/20.500.12990/9725

Huayaney, M. E. A., & Cruz, J. F. M. de la. (2009). Aplicacion de la Teledeteccion para el analisis multitemporal de la regresion glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, *13*(22), 71-83. https://doi.org/10.15381/is.v13i22.7216

Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, *8*(2), 135-140. https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x

INAMHI. (s. f.). Recuperado 15 de enero de 2026, de https://www.inamhi.gob.ec/pronostico/PronosticoEcuador.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report*

of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Janse, R. J., Hoekstra, T., Jager, K. J., Zoccali, C., Tripepi, G., Dekker, F. W., & Van Diepen, M. (2021). Conducting correlation analysis: Important limitations and pitfalls. *Clinical Kidney Journal*, *14*(11), 2332-2337. https://doi.org/10.1093/ckj/sfab085

Jia, P., Wang, Q., Lu, X., Zhang, B., Li, C., Li, S., Li, S., & Wang, Y. (2018). Simulation of the effect of an oil refining project on the water environment using the MIKE 21 model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Biogeochemical Processes in the Changing Wetland Environment*, *103*, 91-100. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.003

Kopp, G., & Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, *38*(1). https://doi.org/10.1029/2010GL045777

Li, T., Wang, Y., Huai, B., An, H., Wang, L., & Sun, W. (2025). Assessment of Glacier Transformation in China over the Past 40 Years Using a China-Specific Glacier Classification System. *Remote Sensing*, *17*(13), 2289. https://doi.org/10.3390/rs17132289

Lukács, R., Harangi, S., Guillong, M., Bachmann, O., Fodor, L., Buret, Y., Dunkl, I., Sliwinski, J., von Quadt, A., Peytcheva, I., & Zimmerer, M. (2018). Early to Mid-Miocene syn-extensional massive silicic volcanism in the Pannonian Basin (East-Central Europe): Eruption chronology, correlation potential and geodynamic implications. *Earth-Science Reviews*, *179*, 1-19. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.005

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, *13*(3), 245-259. https://doi.org/10.2307/1907187

Menzie, K. (2022). *Todo Sobre el Calentamiento Global: Descubre lo que esta Causando los Cambios más Fuertes en Nuestro Planeta*. Kit Menzie.

Nafigin, I. O., Ishmukhametova, V. T., Ustinov, S. A., Minaev, V. A., & Petrov, V. A. (2022). Geological and Mineralogical Mapping Based on Statistical Methods of Remote Sensing Data Processing of Landsat-8: A Case Study in the Southeastern Transbaikalia, Russia. *Sustainability*, *14*(15), 9242. https://doi.org/10.3390/su14159242

Newton, M., Evans, D. J. A., Roberts, D. H., & Stokes, C. R. (2018). Bedrock mega-grooves in glaciated terrain: A review. *Earth-Science Reviews*, *185*, 57-79. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.007

Oliva, M., Ruiz-Fernández, J., Barriendos, M., Benito, G., Cuadrat, J. M., Domínguez-Castro, F., García-Ruiz, J. M., Giralt, S., Gómez-Ortiz, A., Hernández, A., López-Costas, O., López-Moreno, J. I., López-Sáez, J. A., Martínez-Cortizas, A., Moreno, A., Prohom, M., Saz, M. A., Serrano, E., Tejedor, E., … Vicente-Serrano, S. M. (2018). The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews*, *177*, 175-208. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.010

Pan, S., Liu, Z., Han, Y., Zhang, D., Zhao, X., Li, J., & Wang, K. (2024). Using the Pearson's correlation coefficient as the sole metric to measure the accuracy of quantitative trait prediction: Is it sufficient? *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1480463

Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, *8*(7), 575. https://doi.org/10.3390/rs8070575

Pique, G., Batallas, R., López, R., & Sabater, S. (2017). The fluvial sediment budget of a dammed river (upper Muga, southern Pyrenees). *Geomorphology*, *293*, 211-226. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.018

Pons, X., Pesquer, L., Cristóbal, J., & González-Guerrero, O. (2014). Automatic and improved radiometric correction of Landsat imagery using reference values from MODIS surface reflectance images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *33*, 243-254. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.002

Povea Cañar, M. J. (2020). *Caracterización geológica de los lahares secundarios en el flanco oriental del volcán Cotopaxi* [bachelorThesis, Quito, 2020.]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20836

Prieto-Amparan, J. A., Villarreal-Guerrero, F., Martinez-Salvador, M., Manjarrez-Domínguez, C., Santellano-Estrada, E., & Pinedo-Alvarez, A. (2018). Atmospheric and Radiometric Correction Algorithms for the Multitemporal Assessment of Grasslands Productivity. *Remote Sensing*, *10*(2), 219. https://doi.org/10.3390/rs10020219

Robalo Cabrera, I., Aguilar Torres, M. A., & Manzano Agugliaro Agu, F. (2025). *Introducción a la Teledetección en Agronomía y ciencias afines* (1.ª ed.). Universidad Almería. https://editorial.ual.es/libro/introduccion-a-la-teledeteccion-en-agronomia-y-ciencias-afines_159795/

Robson, B. A., Bolch, T., MacDonell, S., Hölbling, D., Rastner, P., & Schaffer, N. (2020). Automated detection of rock glaciers using deep learning and object-based image analysis. *Remote Sensing of Environment*, *250*, 112033. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112033

Rodriguez. (2023, mayo 22). *Volcanes: Qué son y cómo se forman*. National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/volcanes-que-son-como-se-forman_18140

Sakakibara, D., & Sugiyama, S. (2018a). Ice front and flow speed variations of marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, *64*(244), 300-310. https://doi.org/10.1017/jog.2018.20

Sakakibara, D., & Sugiyama, S. (2018b). Ice front and flow speed variations of marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, *64*(244), 300-310. https://doi.org/10.1017/jog.2018.20

Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, *13*(10), 2537-2556. https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019

Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaee, P. H., & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(2), 128-136. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009

Temovski, M., Madarasz, B., & Kern, Z. (2018, julio 16). *Glacial Geomorphology and Preliminary Glacier Reconstruction in the Jablanica Mountain, Macedonia, Central Balkan Peninsula*. https://doi.org/10.3390/geosciences8070270

Valone, T. F. (2021, marzo). *Linear Global Temperature Correlation to Carbon Dioxide Level, Sea Level, and Innovative Solutions to a Projected 6°C Warming by 2100*. https://doi.org/10.4236/gep.2021.93007

Veettil, B. K., Pereira, S. F. R., Wang, S., Valente, P. T., Grondona, A. E. B., Rondón, A. C. B., Rekowsky, I. C., Souza, S. F. de, Bianchini, N., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes

Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas: Una mirada desde el sur*, (51), Pág. 3-36. https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215

Veettil, B. K., Wang, S., Florêncio de Souza, S., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2017). Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, *77*, 218-246. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.009

Velasco, N. (2024, diciembre 19). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR DEL COTOPAXI*. ArcGIS StoryMaps. https://storymaps.arcgis.com/stories/1887f24bbe6b469184d64668138f372e

Velez, E. F. A., Díaz, H. C., Rodriguez, J. O. G., & Morales, J. A. O. (2018). Revista AZIMUT. *Revista de Topografía AZIMUT*, *9*(1), 37-45.

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., … Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, *225*, 127-147. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., … Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, *280*, 113195. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195

Zapata Tapia, M. C. (2015). *Estimación del volumen de los glaciares antisana 12 y antisana 15 mediante el método geofísico de radar de penetración de suelo (gpr).* [bachelorThesis, Quito, 2015.]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12059

Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019a). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, *568*(7752), 382-386. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0

Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019b). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, *568*(7752), 382-386. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0