

DETECCIÓN DE CAMBIOS EN EL GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ
ENTRE LOS AÑOS 1959 Y 2014.

JULIÁN GÓMEZ ARBELÁEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES.
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA.
SANTIAGO DE CALI
2016

DETECCIÓN DE CAMBIOS EN EL GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ
ENTRE LOS AÑOS 1959 Y 2014.

PRESENTADO POR

JULIÁN GÓMEZ ARBELÁEZ
UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
E-MAIL: juliangoar21@gmail.com

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR PARA EL TÍTULO DE
GEÓGRAFO.

DIRECTOR: LUIS MARINO SANTANA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
E-MAIL: luis.santana@correounivalle.edu.co

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES.
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA.
SANTIAGO DE CALI
2016



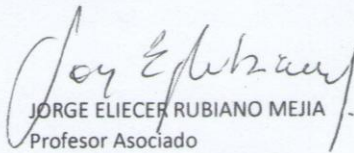
Santiago de Cali, Abril 5 de 2016

Profesor
JAIME VÁSQUEZ
Programa de Geografía
Director

Cordial Saludo

Por medio de la presente manifiesto que he revisado las correcciones realizadas al trabajo de grado titulado "Detección de cambios en el Glaciar del Volcán Nevado del Ruiz entre los años 1959 y 2014" realizado por Julián Gómez Arbeláez, Estudiante de Geografía de la Universidad del Valle identificado con código 1039334. El estudiante ha respondido las observaciones entregadas en comunicación anterior y he evidenciado los ajustes realizados al documento en versión entregada vía electrónica. En consecuencia, considero que el trabajo de grado puede recibir la calificación de APROBADO sin más correcciones al documento final.

Atentamente,


JORGE ELIECER RUBIANO MEJIA
Profesor Asociado
Departamento de Geografía
Universidad del Valle.

Santiago de Cali, Marzo 8 de 2016

Profesor

JAIME VASQUEZ SANCHEZ

Director del Programa Académico de Geografía.



Cordial saludo Profesor Vásquez, dando alcance a la evaluación del trabajo titulado "Detección de cambios en el glaciar del volcán Nevado del Ruiz entre los años 1959 y 2014", dirigido por el Profesor Luis Marino Santana Rodríguez y elaborado por el estudiante Julián Gómez; me permito informar que el trabajo en mi concepto es **APROBADO** pues se cumplen los objetivos propuestos, hay coherencia metodológica y argumentativa; las conclusiones corresponden al tema desarrollado y se hace uso correcto de la redacción.

Se destaca del trabajo, la organización, la pertinencia del tema, la buena redacción y facilidad de lectura, así como el abordaje del tema. Cualquier inquietud al respecto o información adicional, con gusto la atenderé.

Cordialmente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yesid Carvajal Escobar', written over a horizontal line.

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Profesor Escuela de Ingeniería Agrícola y Recursos Hídricos

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos y Suelos – IREHISA

A mis padres, mi hermano y mi abuelita Àngela...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Fernando y Carmenza y a mi hermano José Fernando, que siempre estuvieron a mi lado, sin su ayuda yo no hubiera podido terminar mi carrera y ser la persona que soy. Seguidamente a mi familia compuesta principalmente por mi Abuelita Ángela que quiero tanto y que hace poco se fue con Dios para estar junto a mi abuelo Ricardo. También mis agradecimientos a mi tío Javier y familia, tía Lida y Fabiola, tío Jaime y familia, tío César y tía Lucía y familia, y demás familiares que en algún momento de estos cinco años me dieron la mano para alcanzar este logro; mi más sincera gratitud para ellos.

Dentro de la Universidad tuve la oportunidad de recibir la orientación de excelentes personas y profesionales que siempre estuvieron prestos a colaborar en lo que yo les solicitaba, inicialmente al profesor Luis Marino Santana que me alentó para empezar este proyecto que ya se ve culminado, gracias a él por su orientación y su colaboración, sin él no hubiese podido culminar este proceso. A los profesores Rodolfo Espinosa, Javier Thomas, Cecilia Orozco y Jorge Zapata, y especialmente a Ramón Serna, Yesid Carvajal y Jorge Eliécer Rubiano les agradezco por su orientación en el día a día de mi aprendizaje y por siempre estar disponibles y atentos a resolver mis dudas. Al profesor Alexánder Ariza y Jorge Luis Ceballos por su orientación en temas de glaciología.

En mi proceso educativo, lo que más me marcó fue mi desempeño como analista en el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, en el cual aprendí a trabajar en equipo y logré empaparme de conocimientos más allá de mi disciplina. Le agradezco profundamente al profesor Elkin de Jesús Salcedo por darme la oportunidad de aprender junto a él a ser una mejor persona y un mejor profesional; sin su apoyo yo no hubiera logrado culminar estos estudios. A mi compañera de estudio Lina que siempre me apoyó y ayudó en los tiempos difíciles, a Danny, Nathalie, Jhonatan, Leandro, Paula y demás compañeros que pasaron junto a mí algún tiempo en el Observatorio, gracias por todo. A Fabio Alexánder Castro que siempre estuvo pendiente de mi trabajo y me ayudó en la realización de la cartografía del presente trabajo de grado; a él muchas gracias. A Jhoan Fergusson por acogerme en su hogar cuando lo necesitaba, a mis demás amigos que me ayudaron en este proceso, a ellos muchas gracias. Le agradezco a Leidy Johanna Guevara por su apoyo y motivación en la última fase de mi estudio. Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales - IDEAM, al Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS y a Parques Nacionales Naturales de Colombia por el apoyo en la cesión de los datos.

RESUMEN

Los glaciares tropicales evidencian cambios drásticos en área y volumen atribuido a las condiciones climáticas predominantes que desde la revolución industrial se han registrado cada vez más variables en relación con los mismos periodos de tiempo en años anteriores. La identificación de estos cambios por medio de técnicas de teledetección como la diferenciación de imágenes constituye una herramienta de gran ayuda para la estimación del área de coberturas como la nieve o el hielo para lograr encontrar sus diferencias a lo largo de un tiempo específico. Además, el estudio de variables climatológicas como la temperatura en periodos de tiempo prolongados, fundamenta más sólidamente la hipótesis planteada anteriormente. El propósito entonces de esta investigación es evidenciar los cambios en área del glaciar y de altura de la línea de nieves perpetuas del Volcán Nevado del Ruiz de Colombia, en un intervalo de 55 años mediante el uso de técnicas de teledetección como la clasificación y diferenciación de imágenes; y a su vez realizar un análisis detallado de la temperatura, para describir su comportamiento y comparar la variabilidad de esta con los cambios en las medidas del casquete glaciar. Los resultados muestran una elevación contundente de la línea de nieves perpetuas en el que se reduce el área del casquete a más de la mitad desde la etapa inicial del estudio y un ascenso de más de 1°C en la temperatura para el periodo del estudio.

ABSTRACT

Tropical glaciers show dramatic changes in area and volume attributed to the prevailing climatic conditions, since the industrial revolution there have been increasingly variable in relation to the same periods in previous year. Identifying these changes through remote sensing techniques as differentiation of images is a useful tool for estimating the area of the glacier in different times. The purpose of this research is to show the change in area of the glacier present in the Volcan Nevado del Ruiz in Colombia, in a range of 55 years using remote sensing techniques such as classification and differentiation of images. In addition, the study of climatic variables as temperature over long periods of time based more solidly the hypothesis above. The results show a strong rise in the line of perpetual snow in the area of the cap is reduced to more than half from the initial stage of the study.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	25
1.4 OBJETIVOS.....	34
1.4.1 GENERAL	34
1.4.2. ESPECÍFICOS.....	34
2. MARCO CONCEPTUAL.....	34
2.1 Detección de cambios.....	34
2.2 Sistema climático.....	37
2.2.1 Clima.....	37
2.2.2 Cambio climático.....	38
2.3 Glaciares.....	39
2.3.1 Formación del hielo glaciar	40
2.3.2 Tipos de glaciares	42
2.3.3 Dinámica glaciar	43
2.3.4 Los glaciares intertropicales	45
2.4 Teledetección.....	50
2.4.1 La imagen satelital	52
2.4.2 La teledetección del hielo y la nieve.....	53
3. METODOLOGÍA.....	60
3.1 Área de estudio.....	60
3.1.1 Descripción física del Parque	62
3.1.2 Importancia ecosistémica del parque.....	64
3.2 Materiales y métodos.....	66
3.2.1 Materiales.....	66

3.2.1.4 Capas digitales de información geográfica	70
3.2.1.5 Modelo de elevación digital -MED-	71
3.2.2 Métodos	71
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1 Estado del Glaciar del Volcán Nevado del Ruiz para el año 1959.....	81
4.3 Resultados clasificación de las coberturas para los años 1985, 1993, 2003 y 2014..	83
4.2.1 Área y altura del glaciar del Ruiz para 1985	85
4.2.2 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1996	86
4.2.3 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2003	88
4.2.4 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2014	89
4.3 Comportamiento de la temperatura para los periodos 1959–1985 y 1985–2014.....	91
4.4 Análisis comparativo entre el comportamiento de la temperatura cerca al glaciar y los valores de pérdida de altura y área del mismo	111
4.5 Resultados de la matriz de confusión y la matriz de transición.	116
4.6 Discusión	117
5. CONCLUSIONES.....	120
5. RECOMENDACIONES.....	122
7. BIBLIOGRAFÍA.....	123

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PERSPECTIVA GLOBAL SOBRE LOS RIESGOS CONEXOS AL CLIMA.	19
FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA GLOBAL Y SU PROYECCIÓN, MEDIANTE ALGUNOS ESCENARIOS DE EMISIÓN.	20
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE CONVERSIÓN DE LA NIEVE RECIÉN CAÍDA EN HIELO GLACIAR.	41
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DEL FLUJO GLACIAR DESDE LA ZONA DE ACUMULACIÓN A LA DE ABLACIÓN.	44
FIGURA 5. FRECUENCIA DE LOS EPISODIOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA DESDE 1950 HASTA 2000.	47
FIGURA 6. EVOLUCIÓN DEL GLACIAR CHACALTAYA (BOLIVIA) ENTRE LOS AÑOS 1940 Y 2007.	49
FIGURA 7. CURVAS DE REFLECTANCIA DE LA NIEVE - HIELO, SEGÚN SU ESTADO.....	54
FIGURA 8. CURVAS DE REFLECTANCIA DE LA NIEVE, VEGETACIÓN, AGUA Y ROCA.....	55
FIGURA 9. <i>CRONOLOGÍA DE LA CONSTELACIÓN LANDSAT</i>	56
FIGURA 10. DIGITALIZACIÓN DEL MAPA DE WILFRED LINDER (1985).....	72
FIGURA 11. PROCESO REALIZADO A LAS IMÁGENES SATELITALES.....	73
FIGURA 12. EJEMPLO DE UNA IMAGEN SIN CORRECCIÓN (IZQ) Y CON CORRECCIÓN (DER) PARA 2014.	74
FIGURA 13. EJEMPLO DE UNA IMAGEN EN COMPOSICIÓN RGB 5 – 7 – 4 PARA EL AÑO 2014.	75
FIGURA 14. IMAGEN EN COMPOSICIÓN RGB 5 – 7 – 4 CON LOS POLÍGONOS DE ENTRENAMIENTO PARA EL AÑO 2014.	76
FIGURA 15. MODELO 3D DE COBERTURA GLACIAR DE WILFRED LINDER, OBTENIDO A PARTIR DE CURVAS DE NIVEL PARA EL AÑO 1959.....	83
FIGURA 16. IMÁGENES DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA MARZO DE 1985, AGOSTO DE 1996, JULIO DE 2003 Y DICIEMBRE DE 2014.....	84
FIGURA 17. ÁREA DEL CASQUETE GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 1985.....	85
FIGURA 18. PUNTOS DE MUESTREO PARA LA ALTURA DEL CASQUETE PARA EL AÑO 1985.....	86
FIGURA 19. ÁREA DEL CASQUETE GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 1996.....	86
FIGURA 20. ÁREA DEL CASQUETE GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 1996.....	87
FIGURA 21. ÁREA DEL CASQUETE GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 2003.....	88
FIGURA 22. ÁREA DEL CASQUETE GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 2003.....	88
FIGURA 23. ÁREA DEL CASQUETE PARA EL AÑO 2014.	89
FIGURA 24. IMAGEN EN FALSO COLOR DEL GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA EL AÑO 2014, SOBRE UN MODELO 3D.	90
FIGURA 25. TEMPERATURAS MÍNIMAS QUE SUPERAN AL PROMEDIO POR AÑO.	102
FIGURA 26. TEMPERATURAS MÁXIMAS QUE SUPERAN AL PROMEDIO POR AÑO.....	103
FIGURA 27. TEMPERATURAS MAYORES A 10°C.	103

FIGURA 28. TEMPERATURAS MENORES A 0°C.....	104
FIGURA 29. PROMEDIOS DE TEMPERATURAS MÍNIMAS Y MÁXIMAS.	105
FIGURA 30. TEMPERATURAS MÍNIMAS EXTREMAS.	106
FIGURA 31. TEMPERATURAS MÁXIMA MÁS BAJA.....	107
FIGURA 32. DÍAS CALUROSOS.	108
FIGURA 33. DÍAS FRESCOS.	109
FIGURA 34. RANGO DIURNO DE TEMPERATURA.....	110
FIGURA 35. ESQUEMA DE LA TOMA DE DISTANCIA VERTICAL DESDE LA ALTURA INFERIOR DEL GLACIAR HASTA LA CIMA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO.	112

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. POBLACIÓN COLOMBIANA EN PROYECCIÓN HASTA 2050.....	21
GRÁFICO 2. TAZA DE URBANIZACIÓN EN COLOMBIA CON PROYECCIÓN HASTA 2050.....	21
GRÁFICO 3. PROMEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURAS PARA LOS PERIODOS 1959 A 1985 Y 1985 A 2014.....	92
GRÁFICO 4. PROMEDIOS ANUALES DE TEMPERATURAS PARA LOS AÑOS 1985 A 2014.	93
GRÁFICO 5. GRAFICO COMPARATIVO DE PROMEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURAS PARA LOS AÑOS 1985 Y 2014.	94
GRÁFICO 6. PROMEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA EL PERIODO ENTRE 1985 A 2014.....	95
GRÁFICO 7. PROMEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURAS MÍNIMAS PARA EL PERIODO ENTRE 1985 A 2014.....	96
GRÁFICO 8. PROMEDIOS ANUALES DE TEMPERATURAS PARA LOS AÑOS 1981 A 2014.	97
GRÁFICO 9. TEMPERATURAS (°C) MÁXIMAS ABSOLUTAS PARA LOS AÑOS 1985 Y 2014.....	98
GRÁFICO 10. TEMPERATURAS MÁXIMAS PROMEDIOS PARA LOS AÑOS 1985 Y 2014.....	99
GRÁFICO 11. TEMPERATURAS MÍNIMAS (°C) PROMEDIOS PARA LOS AÑOS 1985 Y 2014.	100
GRÁFICO 12. TEMPERATURAS MÍNIMAS ABSOLUTAS (°C) PROMEDIOS PARA LOS AÑOS 1985 Y 2014.	101

LISTA DE MAPAS

LOCALIZACIÓN DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ EN EL PNN LOS NEVADOS DE COLOMBIA.	60
DISTRIBUCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS PRESENTES EN EL PNN LOS NEVADOS DE COLOMBIA.	64
UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRISAS.	70
MAPA DEL GLACIAR DEL RUIZ PARA LOS AÑOS 1959 POR WILFRED LINDER.....	82
ESTADO DEL GLACIAR DEL NEVADO DEL RUIZ PARA LOS AÑOS 1959, 1985 Y 2014.	114

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad en este siglo, es el aumento considerable de la población en la mayoría de los países del globo y sobre todo en los cascos urbanos de las ciudades. Según la Organización de Naciones Unidas (2014), en su informe sobre la situación demográfica del mundo en 2014, para el año 1994 se calculaba que el planeta estaba habitado por unos 5.700 millones de personas, con un incremento aproximado de 84 millones de habitantes al año; pero para el año 2011 se alcanzaron los 7.000 millones, con una tasa de crecimiento de 1,2% al año, además de un evidente desequilibrio entre los países desarrollados y los que están en vía de serlo, pues en el continente africano y el asiático se alberga el 80% de la población del mundo; y la que posee, en comparación, las mayores tasas de crecimiento poblacional del planeta. La Organización concluye que de mantenerse la trayectoria actual, la población mundial alcanzará 8.100 millones en 2025 y 9.600 millones en 2050.

Este crecimiento de la población ha traído consigo una serie de consecuencias que han contribuido a deteriorar las condiciones del sistema terrestre, pues, en otras, se han incrementado los problemas medioambientales del planeta. El sistema climático y todos sus componentes, aunque variables en el tiempo, parecen ser frágiles; pero sin duda los cambios que experimentan tienen graves consecuencias en los ecosistemas.

Todos los ecosistemas y ambientes presentes en la Tierra, tanto acuáticos como terrestres, se ven afectados por el cambio climático, unos más que otros dependiendo de su vulnerabilidad; la cuál está determinada por su exposición o su sensibilidad a los cambios exteriores. Considerando los ambientes, algunos se catalogan como de alto riesgo o de mayor fragilidad, como los glaciares de alta montaña, que responden a estos cambios más visible y rápidamente que otros. La determinación de las dinámicas que afectan este ambiente en especial, puede ayudar a evidenciar el problema mayúsculo que trae consigo el cambio climático e igualmente contribuye a generar conciencia en las autoridades

ambientales y en la población civil para que se tomen medidas al respecto. En Colombia, estos cambios globales han representado modificaciones en las condiciones hidrometeorológicas que han imperado en el territorio. por ejemplo, se ha encontrado que el país ha tenido cambios de la temperatura y en la cantidad y patrón de distribución de las precipitaciones lo que ha derivado en inundaciones, como las ocurridas en los años 2010 - 2011, donde el norte del país sufrió la anegación de aproximadamente 4 millones de hectáreas por el fenómeno de La Niña (CEPAL - BID, 2012) y la afectación de casi 2,5 millones de personas (Presidencia de la República, 2011); de forma similar están documentadas las consecuencias de procesos de sequías, a causa de El fenómeno de El Niño (Francou & Pizarro, 1985). Estas anomalías también han afectado los distintos hábitats naturales, ocasionando que se perturben de forma radical o llegando, en algunos casos, a desaparecer.

El Parque Nacional Natural Los Nevados de Colombia, ubicado en los departamentos de Risaralda, Quindío, Caldas y Tolima poseía, hacia los años 20 del siglo pasado (IDEAM, 2013), cuatro cumbres nevadas (volcanes Nevado del Ruíz y Tolima, y nevados de Santa Isabel y del Quindío); las que han ido perdiendo gradualmente el área congelada por el establecimiento de condiciones adversas del clima; de estos nevados, actualmente solo existen tres (Nevado del Ruíz, de Santa Isabel y del Tolima), pero cada vez con menos área con nieve. Es así como surge la necesidad de realizar investigaciones que establezcan los cambios que ha tenido el área glaciar en los mencionados nevados, y que permitan conocer en qué medida el cambio climático global ha afectado estos ambientes de alta montaña, explorando también sobre las variables que intervienen en este fenómeno; indagaciones que se convierten en los objetivos del presente trabajo.

El presente documento se desarrolla en cuatro partes fundamentales. En la primera y segunda partes se realiza la formulación del problema y se desarrolla toda la conceptualización de las variables consideradas en el estudio. En la tercera se describen los materiales y métodos usados para abordar el trabajo. Por último, se presentan los resultados, así como las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La adaptación y mitigación al cambio climático global son algunos de los retos más grandes a los que está enfrentada nuestra sociedad en la actualidad, pues el uso y consumo desproporcionado de los combustibles fósiles, en todas sus presentaciones, ha incrementado la incidencia de la mano del hombre en la aceleración de este proceso. El estilo de vida actual, especialmente el de los países más ricos y con mayor desarrollo, como los del occidente de Europa y los de Norteamérica (Comisión Europea, 2006), determinan un nivel de consumo de energía exorbitante, pues el uso masivo de vehículos motorizados y las industrias que producen los artículos que sostienen el mercado compulsivo de estas regiones, contribuyen al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero -GEI-, los que, como está demostrado, determinan el aumento en la temperatura. Además, el aumento desmedido de la población en los países en vías de desarrollo, ha hecho que las tierras se deterioren por el sobreuso, realizado en muchos casos para lograr la alimentación de cada vez más personas, pues según la FAO (2009) se deben incrementar los rendimientos de los cultivos en aproximadamente 90% para solventar las necesidades de la población en edad productiva, que es la porción más grande en estas regiones.

El aumento de las emisiones de gases ha generado que las dinámicas naturales del sistema climático se modifiquen y, como consecuencia, afecte de forma negativa a los ecosistemas que estaban adaptados a unas condiciones determinadas sobre la geósfera. Los glaciares, como ambientes naturales, son vulnerables a los cambios de los parámetros climáticos que ocurren, aunque no estén expuestos directamente a la mano del hombre, ya que las alteraciones en la composición de la atmósfera generan modificaciones en las condiciones normales en que estos suelen mantenerse; también, la mayoría de los nevados del trópico, aparecen en cumbres de volcanes, lo que los hace susceptible también a los impactos por las erupciones o emanación de materiales. Estos comportamientos ocasionan que el ciclo hidrológico y el proceso de acumulación/ablación propios de los casquetes cambien y, como consecuencia, los glaciares pueden perder área y volumen, según la intensidad de las

condiciones a las que se están enfrentando, generando un desequilibrio en la masa glaciar (ESA, 2014).

El aumento de la temperatura que ha experimentado el Planeta en los últimos decenios ha afectado a los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Muchas especies animales han modificado sus áreas de distribución geográfica, sus actividades estacionales y hasta el número de individuos. En muchas partes del mundo, las cambiantes precipitaciones o el derretimiento de nieve y hielo están alterando radicalmente los sistemas hidrológicos, lo que afecta la cantidad y la calidad del recurso agua para el consumo. También con el derretimiento se han modificado los niveles de altura y salinidad del mar, con la consecuente alteración de las corrientes marinas (IPCC, 2014).

Todo lo anterior tiene que ver, como ya se dijo, con el consumo desmedido de combustibles fósiles y de productos clorofluocarbonados; también por el uso inadecuado de la tierra y por el modelo de vida extractivista para la acumulación de capital que predomina en las sociedades desarrolladas y las que están en vía de serlo. Según el IPCC (1997) las actividades antrópicas descontroladas están haciendo que la concentración en la atmósfera de GEI sea cada vez mayor, lo que altera los balances radiativos y genera un calentamiento de la atmósfera. En algunas regiones, el efecto de enfriamiento de algunos aerosoles diferentes a los GEI puede ser suficientemente acentuado como para compensar sobradamente el calentamiento debido a los gases de efecto invernadero que producen un efecto contrario sobre los balances radiativos y enfrían la capa gaseosa terrestre. Estos aerosoles no sobreviven en la atmósfera por un tiempo muy prolongado y su efecto no compensará el accionar mundial a largo plazo de los -GEI-, pues su período de vida es mucho más largo y serán predominantes (IPCC, 1997). Los aerosoles solo podrían ayudar en el control del efecto de los -GEI- de manera importante a escala continental. En resumen, estos cambios en las emisiones de gases nos llevarán, según las proyecciones, a cambios continentales y mundiales de la temperatura, precipitación y algunas otras variables climáticas, teniendo como consecuencias más extremas cambios de la humedad del suelo a nivel global, el aumento del nivel medio del mar a escala mundial, y a la

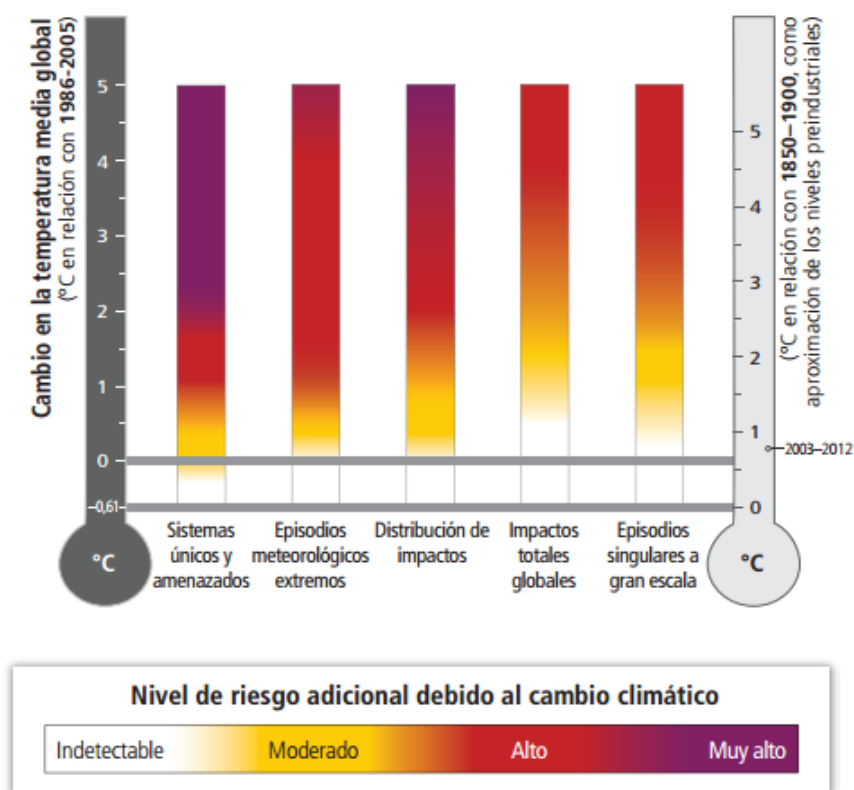
perspectiva de unos valores más extremos de altas temperaturas, de heladas, de crecidas y sequías.

La problemática anterior ha generado bastante preocupación entre la comunidad científica mundial, por lo que se creó el Panel Intergubernamental del Cambio Climático o IPCC, por sus siglas en inglés, que es el organismo mundial que se encarga de las investigaciones en este tema. Este grupo de científicos del clima, tiene dentro de sus resultados a 2015 un gráfico que muestra los diferentes escenarios a los cuales nos podremos ver enfrentados; dentro de ese conjunto se encuentra el 2,6 que es el más conservador, el cual supone que se realizará un recorte en las emisiones, y el 8,5, el más catastrofista, asumiendo que las emisiones van a ser mayores.

En la Figura 1 se muestran a la derecha los riesgos asociados a los motivos de preocupación para niveles crecientes de cambio climático. El degradado vertical en color, indica los riesgos adicionales debidos al CC, dependiendo de un nivel de temperatura determinado, que puede ser sostenido o superado como se puede ver a continuación:

1. Cuando el degradado llega a blanco, indica que al cambio climático no se le atribuye ningún impacto asociado.
2. Cuando hay un riesgo moderado el color se torna amarillo, lo que indica que los impactos asociados son detectables y atribuibles con un nivel de confianza medio, a consecuencia del cambio climático.
3. Para el riesgo alto el degradado se torna rojo, indica impactos graves y extendidos. Además, se incluye el color púrpura que muestra un riesgo muy alto para los riesgos claves, teniendo en cuenta todos los riesgos específicos.

Figura 1. Perspectiva global sobre los riesgos conexos al clima.

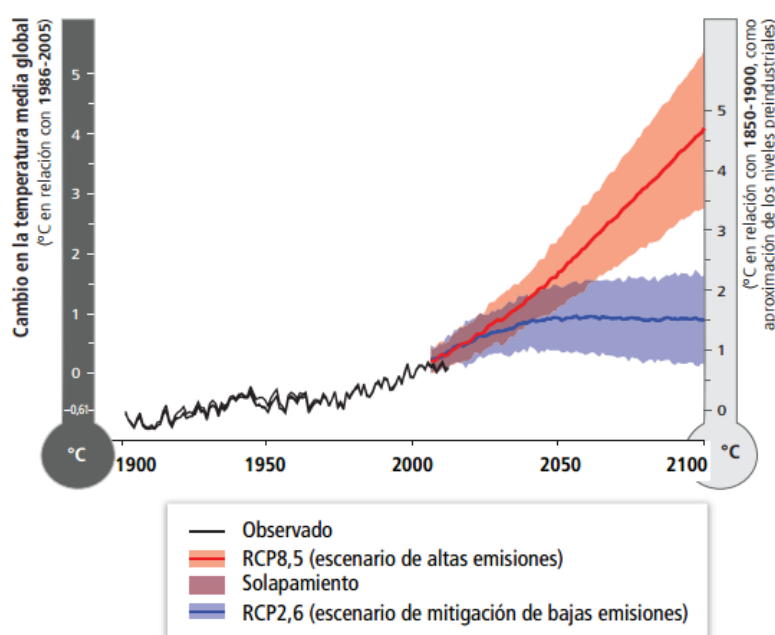


Fuente. IPCC, 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

También se usa como reseña, los promedios en superficie de temperatura anual en el pasado y proyectada al futuro, sobre la base de datos de los índices de temperatura disponibles hasta la actualidad, el cambio entre los promedios del periodo 1850 a 1900 y por último, los datos del periodo de referencia del Quinto Informe de Evaluación de 0,61 °C que para la gráfica, se utiliza como una aproximación del cambio en el promedio global de temperatura en superficie para el periodo previo a la Revolución Industrial, antes de 1750. En este sentido la primera columna indica los sistemas únicos y amenazados entre los cuales están por ejemplo, los manglares y glaciares, que desde la era postindustrial ya están en riesgo moderado y de acuerdo suba el promedio en 1°C se encontraran en riesgo alto y ya para un ascenso de 2°C estarán en la zona de riesgo muy alto (IPCC, 2014).

La Figura 2 muestra los efectos que tendrían, en el aumento de la temperatura, los dos escenarios climáticos comentados anteriormente (de alta y baja emisiones); situaciones que traen retos importantes para la sociedad a futuro, teniendo en cuenta que los cambios de los parámetros climáticos, por mínimos que sean, tienen repercusiones en todos los ecosistemas y más en los que tienen una alta vulnerabilidad, como los páramos y los glaciares tropicales, ya que su adaptabilidad es más difícil.

Figura 2. Evolución de la temperatura media global y su proyección, mediante algunos escenarios de emisión.

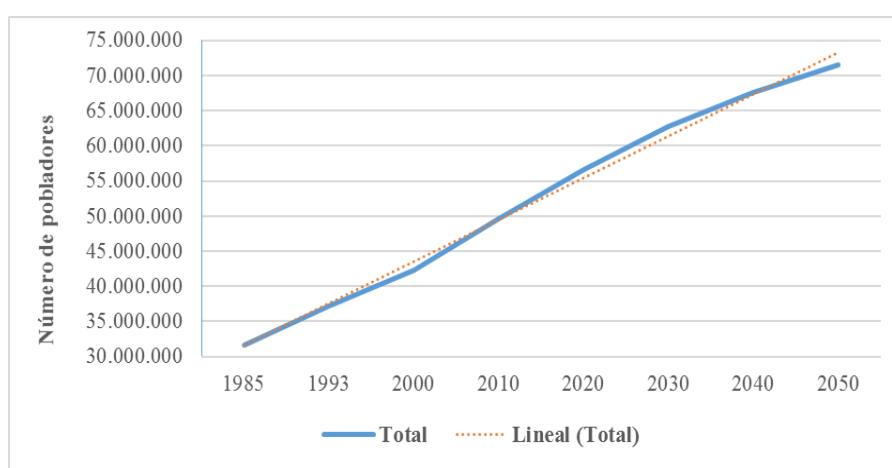


Fuente. IPCC, 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

En nuestro país la problemática no ha sido distinta a la mencionada, ya que es evidente el crecimiento en el uso de maquinarias emisoras de GEI, el uso inadecuado de tierras y la población se ha incrementado considerablemente en los últimos decenios (Ver Gráfico 1). El tema de población en Colombia es complejo; ha pasado de estar 70% asentada en las zonas rurales en los años 50, a tener solo el 25% para los primeros años del siglo 21 (Ver Gráfico 2), desplazamiento que se dió en búsqueda de mejores oportunidades en la ciudad.

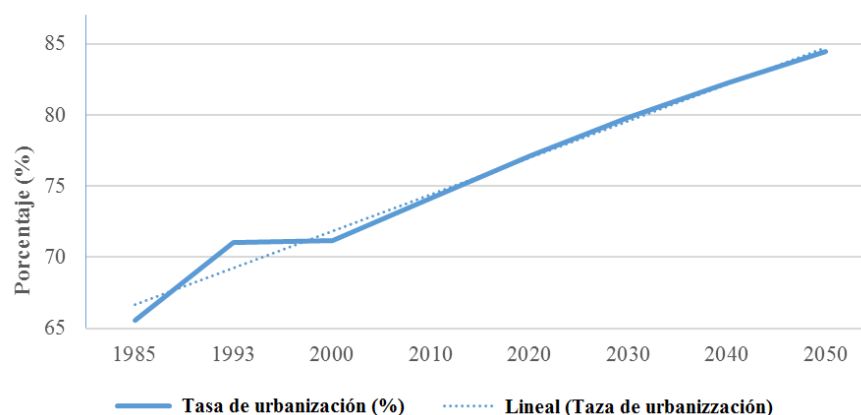
Según el IDEAM – PNUD (2001), la concentración de la población en pueblos y ciudades y la poca preparación estatal para asumir dicho cambio, hacen que a futuro se aumente la vulnerabilidad de la población ante los efectos del cambio climático, pues la probabilidad de aparición de enfermedades como dengue y malaria será mucho mayor y, por otra parte, el posible aumento del nivel medio del océano traerá efectos negativos sobre las zonas costeras.

Gráfico 1. Población colombiana proyectada hasta 2050.



Fuente. Datos proporcionados por el IDEAM – PNUD (2001) y modificados por el autor.

Gráfico 2. Taza de urbanización en Colombia con proyección hasta 2050.



Fuente. Datos proporcionados por el IDEAM – PNUD (2001) y modificados por el autor.

Además, las emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país es un tema de preocupación, ya que, según el inventario realizado por las Naciones Unidas, en la última década las proporciones de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono se han incrementado considerablemente; estos tres tipos de gases son los que más alteran la estructura atmosférica. Datos del IDEAM – PNUD (2001) para los años 1990 y 1994 muestran un incremento de casi un 25% en el total de emisiones (Ver Tablas 1 y 2), en donde se destacan la producción y consumo de energía eléctrica, y la agricultura, como los sectores productivos que más emisión de GEI producen; el primero es mayormente emisor de CO², mientras la agricultura lo hace en metano y óxido nitroso.

Tabla 1. Emisión de GEI en equivalentes de dióxido de carbono para el año 1990.

Sectores	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
Energía	46,886.1	5,634.3	407.5	52,927.0
Procesos industriales	4,744.5	4.2	62.0	4,810.7
Agricultura		31,862.0	23,557.8	55,419.9
Cambio del uso de la tierra y silvicultura	11,879.8	88.7	9.0	11,977.5
Residuos		3,651.9	580.6	4,232.5
Totales (Gg)	63,510.4	41,241.1	24,617.0	129,368.4

Fuente. IDEAM – PNUD (2001).

Tabla 2. Emisión de GEI en equivalentes de dióxido de carbono para el año 1994.

Sectores	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
Energía	55,351.7	5,972.4	476.6	61,800.7
Procesos industriales	5,212.3	8.2	77.5	5,298.0
Agricultura		34,319.5	27,126.6	61,445.1
Cambio del uso de la tierra y silvicultura	16,540.0	88.7	9.0	16,637.7
Residuos		4,061.4	625.0	4,686.4
Totales (Gg)	77,103.9	44,450.1	28,313.7	149,867.8

Fuente. IDEAM – PNUD (2001).

Las actividades mencionadas anteriormente han impactado a la atmósfera y al sistema climático y todas sus variables, pero existen algunas de estas en las que se observa un cambio más visible en comparación con las otras. La temperatura, la precipitación, la humedad, la radiación solar y nubosidad son las variables que más se ven afectadas dentro del cambio climático. Como consecuencia de las alteraciones de estas variables, se puede evidenciar cambios en la masa glaciar a través del tiempo, pues ésta reacciona

drásticamente a cualquier cambio abrupto que puedan tener dichas variables (CAN, 2006). En la revisión bibliográfica previa realizada, se pudo constatar la falta de trabajos sobre las repercusiones del cambio climático en los glaciares de Colombia. Se evidencia que los investigadores nacionales han estado enfocados más en la creación de estrategias de adaptación y mitigación, tomando como punto de inicio los trabajos internacionales de las entidades encargadas del tema. En consecuencia, existe la necesidad de realizar trabajos rigurosos que expongan las condiciones en las cuales está el país en cada una de estas esferas, para así poder realizar un diagnóstico de su estado frente al cambio global.

En la presente investigación se compara el área del glaciar del volcán nevado del Ruiz en el periodo comprendido entre los años 1987 y 2014, por medio de la interpretación de imágenes de satélite, y se compara con las áreas que existían para los años 1959 y 1987, contenidas en mapas de un estudio previo realizado por Wilfred Linder (1993) usando fotografías aéreas; la pérdida de masa glaciar del período 1987 al 2014 fue analizada a la par de ciertos índices de temperatura y lluvias del parque natural, con el propósito de establecer tendencias o relación entre el comportamiento de estos dos parámetros climáticos y la pérdida de hielo – nieve del glaciar Nevado del Ruiz.

Linder, en su trabajo de tesis doctoral titulado: *“Pérdidas de masa de hielo en el Nevado del Ruiz causadas por procesos climáticos y eruptivos durante los últimos 50 años”*, publicada en el año 1993, explica, además, cómo se ha visto afectado el glaciar del Ruiz por eventos catastróficos, como la erupción de 1985 causante del lahar que arrasó con la ciudad tolimense de Armero, y añade una serie de datos climáticos de temperatura y precipitación de la zona para describir su comportamiento y relacionarlo con el derretimiento de la masa de hielo. Como resultado, el autor determina las pérdidas de área, volumen y distancia del nevado entre los años 1959 y 1987, haciendo énfasis en que no se determinan para años anteriores porque no existían datos disponibles, más allá de escritos, relatos y documentos antiguos en los cuales se habla de las características del glaciar. Dado que la investigación de Linder aborda un periodo de tiempo de 28 años, en éste trabajo de grado se analizan, para los 28 años siguientes, la situación del glaciar y los cambios

acontecidos en la superficie nevada, utilizando dos imágenes satelitales (una de 1985 y la otra del 2014) y datos climáticos de todo el período. Con los datos resultantes se hará una comparación de los índices climatológicos, y del área y altura del glaciar para así comparar los tres momentos (1959, 1985 y 2014) y describir el comportamiento de las variables antes mencionadas.

Se entiende que el clima es un factor determinante del mantenimiento y diversidad de la vida en el planeta, por ello es de vital importancia resaltar los cambios que éste está teniendo para lograr la consolidación de estrategias de adaptación y mitigación, así como también lograr modificar los comportamientos en la sociedad que acentúan dicho fenómeno.

En Colombia, existen contadas masas de nieves perpetuas cubriendo los picos más altos de la cordillera Central y las sierras Nevada del Cocuy y de Santa Marta, pero en los últimos años se ha reconocido que están teniendo modificaciones por la afectación directa del aumento de la temperatura, al igual que el retroceso o elevación de la línea de páramo, que delimita a estos ecosistemas, respecto al bosque andino. Este último ecosistema cubre aproximadamente 2 millones de hectáreas de nuestro país, lo que corresponde casi el 2% del territorio, y provee de agua para consumo a casi el 70% de la población colombiana, sirviendo además como regulador del ciclo hidrológico (IDEAM, 2009).

El Parque de los Nevados, contiene algunas de las cumbres nevadas y uno de los páramos más representativos del país, los cuales están sufriendo cambios irreversibles en sus condiciones naturales. Por tanto, la pregunta de investigación que surge es ¿Cuál es el comportamiento del glaciar del Nevado del Ruiz en el Parque Nacional Natural Los Nevados de Colombia, en los últimos 55 años, considerando la temperatura de su entorno?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La disciplina geográfica y su que-hacer son aún algo desconocidos para buena parte de nuestra sociedad. Dentro de los temas o problemáticas de estudio que ésta aborda, están principalmente las derivadas de la interacción de la sociedad y la naturaleza, y las dinámicas de los procesos naturales consecuentes; además de las formas en que los humanos modifican o se apropian de los espacios o lugares. En este sentido, la presente investigación está relacionada con las implicaciones que tienen el ser humano y su comportamiento, en las modificaciones del entorno natural terrestre.

Los glaciares han sido llamados como los termómetros naturales del mundo, ya que, por su esencia, son muy sensibles a cambios medioambientales en su entorno (Mendizábal, 2008); al igual que los ecosistemas de páramos, requieren de una condición equilibrada en el ambiente para que se mantengan en condiciones estables a través del tiempo (Greenpeace, 2009). Éstos dos ambientes, glaciares y páramos, poseen funciones algo similares, dentro de las que se podría establecer a la regulación hídrica como una de las más importantes, debido a que en los dos se almacena gran cantidad de agua, y en diferentes estados, que luego se escurre, faldas abajo de las montañas, a través de quebradas y ríos, cubriendo las necesidades de las comunidades; en el caso de los glaciares son 100% agua (Tarbuck & Lutgens, 2005), mientras en los páramos el contenido de agua corresponde al 75% del total de la unidad (Greenpeace, 2009), lo que los hace un “aljibe natural” en épocas de sequía para los centros poblados más cercanos.

En lo anterior se muestran algunas de las razones por las cuales es importante el monitoreo del estado de los glaciares y los ecosistemas de páramos, ya que de ellos dependen varios elementos que hacen parte importante del sistema tierra y de los cuales depende en gran medida la estabilidad del mismo y de los que lo habitamos. De igual modo se hace perentorio encontrar la verdadera relación que existe entre el clima y sus variables, sobre el comportamiento espacial de los ambientes mencionados, para de esta forma determinar las causas más probables por las cuales están sufriendo estos cambios. Por último, el

reconocimiento de las dinámicas glaciares en función del cambio climático, es de gran ayuda para la planificación territorial, ya que estos ecosistemas cumplen las funciones básicas mencionadas anteriormente, lo que hace importante su conservación, adecuado manejo de las cubiertas y el consumo del agua, para no generar cargas adicionales y ocasionar mayores daños al ecosistema.

Por último, como se mencionó anteriormente, existen pocos trabajos en el país que relacionen tan detalladamente la pérdida de masa glaciar con el comportamiento de variables climáticas como la temperatura. Por tanto este trabajo se convierte en un referente en este tipo de investigaciones.

1.3. ANTECEDENTES

La dinámica de los casquetes glaciares colombianos aún no se conoce con exactitud; solo nos podemos limitar a reconocer su comportamiento de avance y retroceso de acuerdo a algunas temporadas en las cuales se producen los cambios más significativos en las dimensiones de estas coberturas heladas. En los últimos años, debido al monitoreo constante de los glaciares, por parte principalmente de instituciones como el Servicio Geológico Colombiano o el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, se ha reconocido que dichas dimensiones han cambiado significativamente en comparación con décadas anteriores. Este cambio abrupto ha sido atribuido mayoritariamente a un cambio en las condiciones climáticas a nivel global.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO, publicó en el año 2009, un trabajo donde se resalta la importancia de una serie de ecosistemas terrestres y marinos que se ven afectados a consecuencia del cambio climático, en especial se dedica un capítulo a los glaciares del mundo, donde se los cataloga como patrimonio mundial. En este trabajo, se asegura que han estado ocurriendo cambios en los glaciares que no se han podido explicar por la variabilidad natural del clima, condenándolos a desaparecer por completo si la temperatura de nuestro Planeta llega a un incremento de 4° C.

Los investigadores mencionan que el derretimiento de los glaciares no sólo tiene consecuencias adversas para los lugares donde se encuentran, sino que también impacta los ecosistemas aledaños. En este sentido, se tienen algunos ejemplos entre los cuales se puede determinar la creación de lagos glaciares, producto de la acumulación del agua derretida atrapada entre las morrenas creadas previamente por la misma dinámica glaciar. Estas morrenas pueden colapsar al llenar el lago provocando inundaciones en los valles inferiores, afectando poblaciones humanas y biológicas a su paso. Otra consecuencia de este proceso, es la desestabilización del ciclo hidrológico de las cuencas asociadas a los mismos, pues si bien con la reducción del hielo se producirían inundaciones, en el futuro la provisión de agua se vería afectada, pues ya no habría más agua, favoreciendo la sequía, las hambrunas y provocando emergencias sanitarias en las regiones. Por último, los autores aseguran que las especies vegetales y animales corren peligro inminente de extinción, ya que al cambiar su nicho ecológico y no lograr la adaptación tendrán que migrar o simplemente desaparecer.

Además, el mencionado trabajo hace énfasis en el Parque Nacional de Sargamatha en Nepal, situado sobre la cadena montañosa de los Himalayas, el que es analizado como estudio de caso. Este parque posee un amplio valor geológico, biológico y estético por lo que fue declarado en 1979 como patrimonio de la humanidad. En esta región viven varias especies muy particulares como el leopardo de las nieves, el ciervo almizclero y el panda rojo, los cuales se han visto afectados, por la reducción de casi el 67% de los glaciares en la última década. De igual forma, esta región de los Himalayas es la tierra natal de los Sherpas que, desde las primeras expediciones a las cumbres nevadas, han sido guías por excelencia de los investigadores que acuden al lugar con distintas motivaciones de investigación. El estudio de caso también da cuenta de la reducción del glaciar Gangotri en aproximadamente 30 metros por año, debido al incremento de la temperatura en los Himalayas en 1° C desde 1970 hasta la fecha. Adicionalmente, en toda la región se han registrado al menos 15 aluviones por ruptura de morrenas desde los años 90 y se tiene el informe de que 20 de los 2.323 lagos glaciáricos son potencialmente peligrosos para los habitantes de las zonas aledañas. Además, se menciona la importancia de estos glaciares

sobre la provisión de agua de miles de millones de personas que viven en las faldas de la Cordillera, pues según los autores la región de los Himalayas proporciona agua a un tercio de la población del planeta, que no solo la consume sino que usa sus ríos para abastecer sus mercados de la pesca diaria y el mantenimiento de sus cultivos. Por último, los autores tratan también casos como el del Parque Nacional Huascarán en Perú, el fiordo helado de Ilulissat en Dinamarca, el Parque Nacional de Kilimanjaro en la República Unida de Tanzania y el glaciar Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn en Suiza, todos declarados como patrimonio mundial de la humanidad y en peligro de desaparecer a consecuencia del cambio climático global.

En el trabajo realizado por Araos, Godoi y Carvallo en el año 2006, sobre el deshielo de la patagonia y titulado *“Adelgazamiento y dinámica en la zona de ablación del glaciar Tyndall, Campo de Hielo Patagónico Sur”*, se le atribuyó el deshielo de la zona estudiada a las condiciones resultantes del cambio climático global; esta condición se reconoció por medio de balizas localizadas estratégicamente en la superficie glaciar que fueron dejadas en campo por un año que dieron como resultado un adelgazamiento promedio de $2,63 \text{ m a}^{-1}$ entre 2002 y 2003, además de la comparación de dos modelos digitales de elevación de los años 2000 y 2003, que les sirvió para determinar una tasa de adelgazamiento de aproximadamente $2,69 \text{ m a}^{-1}$ entre estos años. Utilizaron la técnica de sondeo por eco-radio (RES) con GPS, que le ayudó a los investigadores a tener una mayor claridad a la hora de la ubicación y la toma de los datos, pues se realiza una vez cada 30 minutos en el tiempo total del muestreo.

Un ejemplo claro de la relación entre el derretimiento de los glaciares y el incremento en la temperatura, es el trabajo realizado por Cáceres et al (2006) titulado *“El glaciar 15 del Antisana investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico”*, en el que los investigadores realizan un arduo trabajo contrastando la información resultante del balance de masa glaciar por mes, que desarrolla una buena información acerca de los cambios estacionales del mismo, con las condiciones de temperatura en la región, que para esos años evidenciaba un incremento de aproximadamente 1° C . Como ellos mismo lo dicen: *“La*

situación es particularmente drámatica para los glaciares de pequeño tamaño (menos de 1km²) los cuales podrían desaparecer en los próximos cinco años”. En el desarrollo del trabajo se muestra cómo los promedios de ablación en los años 90 fueron bastante intensos sobre todo a causa de la acción del Fenómeno de El Niño. Los autores concluyen el trabajo diciendo que la desaparición de los glaciares tropicales son una clara evidencia del accionar del calentamiento global y la variabilidad del clima a una escala mundial y regional.

Ahora bien, el uso de imágenes satelitales para encontrar el deshielo de los glaciares, es una técnica que ha cobrado mucha fuerza desde inicios del siglo XXI; un caso particular es el demostrado en el trabajo titulado “*Incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el comportamiento de glaciares tropicales en Perú*”, realizado por Medina & Mejía en el año 2010, donde encontraron la incidencia de los episodios del fenómeno de El Niño y La Niña sobre el balance de masa glaciar de los nevados el Huandoy y el Pastoruri, en la cordillera Blanca de Perú, por medio del uso de la técnica multifractal, el método de la caja de contar, la diferencia normalizada del índice de nieve o NDSI y la relación de bandas de imágenes satelitales %, del LandSat 5 - TM. El valor añadido de este trabajo radica en la utilización de la técnica multifractal como se dijo anteriormente, la cual que permitió estimar la superficie de elementos fractales en forma probabilística y compararla con la obtenida por el sistema convencional, ayudando así a tener un menor sesgo a la hora de dar los resultados del estudio.

En el artículo publicado en la Revista de teledetección del año 1996 por Alonso y Moreno titulado “*Análisis multitemporal de imágenes LandSat TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica*”, se analiza una metodología que permite extraer información sobre la cubierta de nieve acumulada en las imágenes satelitales, la cual es necesaria para el uso de modelos hidrológicos llamados de “fusión de nieve-escorrentía”. Los autores usan composiciones en falso color obtenidas a través de índices espectrales, para que mediante la metodología, se resalte la nieve de entre otras cubiertas. Por último, se resalta el estudio de la variación temporal del área cubierta por nieve en el macizo de los Montes Maldito en el pirineo Aragonés, España.

El investigador Rafael Cáceres (2007) en su trabajo titulado *“Movimiento lomite de los bosques de Polylepis en relación con el retroceso glaciar en la microcuenca Quillcay - Ancash”*, utiliza sistemas de información geográfica para comparar una serie de fotografías aéreas de los años 60 con una imagen SPOT del año 2007 y así, lograr descubrir la expansión o reducción de los bosques Polylepis ha sido significativo o no en comparación al retroceso acelerado del glaciar de la Cordillera Blanca en Perú. Cáceres concluye que a pesar del cambio en las condiciones climáticas, el bosque no se ha visto muy afectado, por el contrario se ha expandido hacia zonas más altas a diferencia del glaciar que ha perdido gran parte de su masa de hielo.

En el trabajo titulado *“Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia”*, realizado por Zeballos, Soruco, Casucanqui, Goffré y Rabatel en el 2014, se aprecia cómo el uso de las herramientas sistemas de información geográfica y sensores remotos, ayudan a esclarecer problemas ambientales tan sensibles como son las secuelas del cambio climático y sus consecuencias sobre los ecosistemas terrestres y marinos. En este trabajo se emplean imágenes que son corregidas geométrica y atmosféricamente previo a la aplicación de un algoritmo diseñado por los mismos autores para la determinación del área de los objetos. En éste algoritmo se considera la aplicación de una clasificación no supervisada y de índices de diferencia normalizada de vegetación, de nieve/hielo, y de agua. Finalmente, realizaron un análisis de regresión lineal múltiple, contrastando la dinámica espacial de los humedales y glaciares con datos de precipitación acumulada, y datos morfométricos de las cuencas, obtenidos a partir de un mosaico del modelo digital de elevación GDEM - Aster V2 (*Global Digital Elevation Model*, versión 2, Satélite ASTER).

Alrededor del mundo se han realizado trabajos sobre el balance hídrico local, regional y global de la mano de los glaciares, como el presentado por Cesar Portocarrero en 1995 titulado *“Retroceso de glaciares en Perú: Consecuencias sobre los recursos hídricos y los*

riesgos geodinámicos”, donde se trata el tema del manejo a futuro del recurso y de cómo se pueden realizar trabajos de gestión del riesgo latente por las lagunas creadas por dicho deshielo, a su vez que se pueden considerar como pequeños embalses para el abastecimiento de las poblaciones necesitadas. El abastecimiento de recurso hídrico es una razón de peso para que en la actualidad el tema de estos ecosistemas congelados haya tomado mayor relevancia, pues con el constante derretimiento de los glaciares, las reservas de agua para las poblaciones se ven mermadas, lo que condiciona a futuro a buscar nuevas fuentes del recurso o estrategias para que los usuarios lleguen a ella.

Las tendencias globales indican que los ecosistemas de alta montaña están cambiando, lo que no hace ajeno nuestro territorio a esas afectaciones. La tierra como sistema, se encarga de mantener un equilibrio para aminorar los efectos forzados de las dinámicas interiores y exteriores haciendo que el cambio se note en todos los rincones del globo. En este sentido, Colombia y su población se ven enfrentados a un reto mayúsculo, pues por ser un país que es mayoritariamente agrícola, necesita el agua para regar sus cultivos, alimentar su ganado y para el consumo humano y en el futuro se podría ver sin reservas, lo que generaría una inconveniente para asegurar su seguridad alimentaria.

En el país, instituciones como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Comunidad Andina de Naciones (CAN) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia han estado acompañando este proceso de monitoreo y estudiando continuamente dichos cambios para comprender la nueva dinámica glaciar y concientizar a las personas del impacto que tiene y que tendrá la desaparición de los nevados andinos. En un trabajo publicado en el año 2007, y titulado *¿El fin de las cumbres nevadas?, Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina*, un grupo de expertos analiza el comportamiento de los glaciares en la zona andina, y dan indicios de cómo abordar las investigaciones en el contexto del cambio climático en nuestra región, pues según ellos, las características de dichos trabajos deben ser adaptados pues las condiciones de la zona así lo ameritan, como la regulación del ciclo hidrológico o las variaciones en temperatura, precipitación y humedad, de acuerdo a la temporalidad

determinada por los periodos de lluvias y de sequía, que son diferentes en las zonas tropicales e intertropicales a las latitudes altas (Naciones Unidas, 2007).

Los investigadores German Herrera y Jorge Ruiz, estudiaron el retroceso del Glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy en Boyacá entre los años 1986 - 2007, donde examinaron la masa helada mediante imágenes LandSat TM y ETM+ de los años 1986, 2003 y 2007. Adicionalmente, los investigadores usaron un índice usando la banda 4 sobre la banda 5 y una clasificación no supervisada, los cuales fueron comparados para lograr observar si dicho índice era apropiado como metodología para la extracción de la zona glaciar. Encontraron entonces, que el retroceso del glaciar fue más del doble para los cuatro años 2003 - 2007 en comparación de los años 1986 - 2003. Como conclusión final, los autores dicen que el estudio evidenció una tendencia lineal en la pérdida del glaciar, con su posible desaparición hacia el 2028.

En trabajos anteriores realizados en los ecosistemas glaciares de nuestro país, está el de Alexander Ariza (2006) en el nevado del Huila en el que se evidencian cómo estas masas glaciares ha desarrollado una tendencia al retroceso gradual con el paso del tiempo. Ariza en su trabajo usó 3 imágenes de Landsat 5 y 7, a las cuales les realizó correcciones topográficas, geométricas, atmosféricas y conversiones de niveles digitales a reflectividad. Luego de tener las imágenes con su respectiva corrección, procedió a aplicarles el Índice Normalizado de Nieve o NDSI (*Normalized Difference Snow Index*), el cual es derivado del conocido índice normalizado de vegetación -NDVI- (Dossier, 1989), terminando con un resultado final de la pérdida anual de superficie glaciar de aproximadamente el 2% desde 1971 hasta 2001. El anterior trabajo deja la puerta abierta para investigaciones como esta, pues aunque es importante la discriminación de las cifras de pérdida de masa glaciar, se debe realizar una correcta contextualización de los procesos adicionales que intervienen en este cambio, como las alteraciones en variables climatológicas y las acciones antrópicas que se dan en estos ecosistemas.

En el trabajo realizado en el volcán Nevado de Santa Isabel por Llinás & Meneses (2004), los autores evidenciaron el retroceso de la capa helada de este ecosistema en el periodo 1959 - 1995, y determinaron su influencia en el balance hídrico de la cuenca del río Otún. Encontraron el deshielo, por medio del procesamiento de fotografías aéreas, y su posterior digitalización, llegando a modelos TIN, desde los cuales realizaron el cálculo de áreas y volúmenes por medio de la función *CutFill* del software *Arc View 3.2*. Como resultado, Llinás y Meneses encontraron un retroceso del 0,02% anual de la masa glaciar del nevado de Santa Isabel, que afecta en una reducción del caudal de río Otún en aproximadamente 44 lt/seg, haciendo esto a largo plazo un gran inconveniente para el abastecimiento de la población pereirana.

Respecto a investigaciones relacionadas al cambio climático en Colombia, la Segunda Comunicación Nacional Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Colombia (CMNUCC) desglosa, para el 2010, la condición del país con un inventario de gases de efecto invernadero (GEI), además de proponer una clara estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático.

Como se ha visto, en los trabajos realizados sobre esta temática no se ha avanzado significativamente en el análisis entre estadísticas de los glaciares referentes a área o distancia y los datos climáticos de la zona que ayuden a evidenciar claramente cómo estos cambios en la temperatura afectan la dinámica glaciar causando un desbalance que terminaría con ellos. La principal diferencia de este trabajo respecto a los referenciados anteriormente, es que contrario a muchas otras investigaciones, se van a establecer relaciones entre datos climatológicos de temperatura con las variables de deshielo (área y distancia) de los glaciares, lo que hace que las modificaciones en este conjunto de medios sea un buen indicio de los cambios a largo plazo del clima y sus incidencias directas en las transformaciones encontradas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Identificar y describir los cambios en el glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, entre los años 1959 y 2014, mediante la comparación de imágenes satelitales y cartografía generada de fotografías aéreas, y establecer su relación con el comportamiento de la temperatura de la zona.

1.4.2. ESPECÍFICOS

- Cuantificar el área y altitud del glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, en los años 1959, 1985, 1996, 2003 y 2014; para así detectar los cambios ocurridos.
- Analizar el comportamiento de la temperatura en el área circundante del glaciar Volcán Nevado del Ruiz, en el período 1985 - 2014.
- Analizar el comportamiento de la temperatura del aire respecto al área y altitud del glaciar del Volcán Nevado del Ruiz entre los años 1985 a 2014.
- Estimar a futuro el comportamiento del glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, si las condiciones de temperatura a 2014, se mantienen.

2. MARCO CONCEPTUAL

Esta sección de la investigación, tiene como fin dar una introducción detallada al lector que explique claramente los conceptos y términos usados dentro del trabajo, con el fin de que se logre una adecuada asimilación de los conceptos aquí usados.

2.1 Detección de cambios

La detección de cambios se puede definir como el proceso de identificación de diferencias en el estado de un objeto o fenómeno mediante la observación de que en diferentes momentos. Este proceso es generalmente aplicado a cambios en la superficie de la Tierra en dos o más veces o momentos. La fuente primaria de datos es geográfica y es generalmente en formato digital (por ejemplo, imágenes de satélite), formato analógico (por ejemplo,

fotografías aéreas), o el formato del vector (por ejemplo, los mapas de características). Aunque también existen datos auxiliares (por ejemplo, histórico, económico, etc.) que pueden ser útiles (Theau, 2008).

En la historia de la humanidad, la detección de cambios en superficie y sus herramientas, fueron utilizados hacia los años 1859, donde se registra la primera fotografía aérea; fue tomada por Tournachon para la determinación del área de cultivos. Luego se usó en la determinación de información militar clasificada con fines bélicos en la Primer y Segunda Guerra Mundial. Considerando datos digitales, desde la aparición del primer satélite LandSat I, se cuenta con una continuidad temporal de los datos y mejor accesibilidad gratuita a cualquier persona que lo solicite, de buena calidad y óptima resolución para estudios no muy detallados (Theau, 2008). En la actualidad existen además de las plataformas satelitales que tienen instrumentos de alta fidelidad abordo, vehículos no tripulados o drones, que proporcionan una plataforma móvil a altura media en la cual se pueden disponer instrumentos de toma de imágenes, ópticos, térmicos, acústicos, etc.

Científicamente, este proceso se fundamenta en que la superficie de la Tierra está cambiando constantemente de muchas maneras. En primer lugar, las escalas de tiempo, por lo que pueden producirse cambios, son muy heterogéneas. Pueden variar desde eventos catastróficos (por ejemplo, inundaciones) a eventos geológicos (por ejemplo, la deriva continental) que corresponden a un gradiente donde lo puntual y continuo cambia respectivamente. En segundo lugar, las escalas espaciales, en la que se pueden producir cambios, también son muy heterogéneas y puede variar de eventos locales (por ejemplo, la construcción de carreteras) a cambios globales (e. g., la temperatura del agua del océano). Debido a esta gama espacio-temporal, la naturaleza y el alcance de estos cambios son complejos para determinar, porque están interrelacionados y son interdependientes en diferentes escalas (espacial, temporal).

Por lo tanto, la detección de cambio es una tarea difícil. En el caso puntual de esta investigación donde se van a usar imágenes de satélites, se pueden dilucidar algunas

características de las imágenes que pueden sugerir cambios como la luminosidad, que puede cambiar, pero se debe tener en cuenta la calibración del sensor, el ángulo solar y las condiciones atmosféricas. La primera premisa para determinar cambios, es que la superficie debe dar cambios en los valores de radiancia. En segundo lugar, el cambio en la luminosidad debido a los cambios en la superficie terrestre es más significativo que los cambios en la luminosidad por otros factores (Theau, 2008).

Para la selección de la información y el preprocesamiento, se debe tener en cuenta la importancia del tiempo de captura, pues está relacionado por ejemplo, con la fenología, los cambios atmosféricos y condiciones climáticas además del brillo solar. El mejor tiempo del año para realizar estudios de cambios en la superficie se remite al verano, pues en este lapso de tiempo existe un menor cambio fenológico y mejores condiciones climáticas (Theau, 2008).

Los métodos más utilizados en la actualidad son la diferenciación de imágenes, que se define como la diferenciación de niveles digitales de cada pixel de acuerdo a su par en la misma ubicación pero en otra temporalidad; el análisis de componentes principales, el cual hace una reducción en la cantidad de variables que existen en el conjunto de datos, para así lograr una mayor atención a lo que es realmente representativo de dichos datos. Y por último, la comparación posterior a la clasificación, en la cual se debe realizar primero una clasificación de las imágenes para lograr determinar los pixeles hermanos (de acuerdo a sus niveles digitales similares) y agruparlos en clases. Luego de esto, se comparan las clases que existen en el conjunto de imágenes utilizadas y se procede a extraer los cambios en ellas (Lu *et al*, 2004).

Dichos cambios también se pueden encontrar por diferentes métodos, entre los cuales se pueden mencionar la post clasificación o clasificación delta, clasificación multitemporal directa y transformaciones lineales, cambios de análisis vectorial y la regresión de imágenes (Theau, 2008).

2.2 Sistema climático

El planeta Tierra es un sistema complejo que según Tarbuck & Lutgens (2005), se compone de cinco subsistemas en su sentido más general; estos son la atmósfera, que es toda la capa gaseosa que esta sobre la superficie hasta el límite con el espacio exterior; la hidrosfera, que se compone de todo el recurso hídrico que existe sobre la superficie terrestre entre mares, lagos, ríos, etc; la criósfera, en donde se distinguen los glaciares, el hielo de las tundras y todo el hielo contenido en los polos; la litósfera, superficie sólida donde se desarrolla la mayoría de los procesos antrópicos; y la biosfera, compuesta por todo el conjunto de flora y fauna terrestre. Las dinámicas e intercambios entre estos subsistemas o componentes son parte importante en la regulación del clima y su modificación en el tiempo. De igual forma el planeta evoluciona bajo la influencia de su propia dinámica interna y/o externa, como consecuencia de las erupciones volcánicas, las que pueden llegar a formar una capa de gases y/o partículas tan densas y tan grandes que pueden cubrir el globo o parte de él, alterando las condiciones normales en superficie y en todo el sistema; las variaciones solares a raíz de los ciclos de Milankovitch u otros ciclos orbitales; y de las actividades antrópicas como incitadoras de los cambios ocurridos en la composición atmosférica, derivado de la combustión de hidrocarburos y uso de clorofluorocarbonados. Adicionalmente, el cambio en el uso y destino inadecuado de las tierras, produce cambios significativos en el sistema, pues se llega a un sobre uso o uso inadecuado en diferentes zonas, dándole un uso excesivo a unas y desuso a otras.

2.2.1 Clima

El clima se puede definir de una forma rigurosa como el compendio de las condiciones promedio del tiempo atmosférico o también como una descripción estadística detallada del tiempo en términos de valores promedios y la variabilidad de los parámetros básicos que actúan dentro de este sistema durante períodos que pueden ser de hasta miles de años. El período normal en el que se realizan estudios referentes al clima, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial -OMM- es de habitualmente 30 años, ya que en este

periodo de tiempo es cuando se empieza a conocer verdaderamente el comportamiento de los elementos o variables climáticas. Las principales variables del sistema climático son la temperatura, que depende principalmente de la entrada de energía proveniente del sol; la precipitación, que es la manifestación de la condensación del vapor de agua contenido en la atmósfera; el albedo, correspondiente a la cantidad de energía del sol reflejada en superficie en un área determinada; y la dirección e intensidad del viento, igualmente determinada por las variaciones en presión, derivada de la altitud y de los cambios en la temperatura de las masas de aire. El clima se podría determinar en un sentido más amplio como una descripción del estado del sistema climático y todos los componentes mencionados anteriormente en un periodo extenso de tiempo (IPCC, 2014).

2.2.2 Cambio climático

El concepto de Cambio Climático se entiende en esta investigación como lo determina el Panel Intergubernamental del Cambio Climático o IPCC; ellos consideran a este fenómeno como una variación estadística importante en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un periodo de tiempo determinado, habitualmente de décadas o escalas de tiempos mayores. En un sentido más general, el cambio climático se entiende como una variación considerable y sustancial en los cambios naturales propios del sistema climático. Este cambio se puede deber a procesos terrestres naturales internos o a cambios externos a los que nuestro planeta se ve forzado, o también a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo, tal como se dijo anteriormente. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático o CMCC del año 1992, en su Artículo 1, define el cambio climático como: *“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”*. La CMCC aclara las diferencias entre cambio climático, que es atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica, y la variabilidad climática, atribuida a causas naturales propias del sistema climático y sus dinámicas internas (IPCC, 2014).

2.2.2.1 Cambio climático rápido

Este concepto ha sido acuñado por el IPCC luego de considerar los fenómenos aislados que se han presentado en nuestro planeta, y que estarían dando evidencia de una aceleración del proceso, lo que se denomina a veces fenómenos repentinos o incluso sorpresivos, teniendo en cuenta que es un sistema no lineal. Algunos de estos cambios repentinos son por ejemplo la acelerada reorganización de la circulación termohalina en los océanos, la rápida retirada de los glaciares tropicales y polares, o la fusión masiva del permafrost en la tundra, que llevaría a cambios repentinos en el ciclo de carbono (IPCC, 2014).

2.2.2.2 Variabilidad climática

La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos como las desviaciones estándar (típicas) o la ocurrencia de fenómenos extremos del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales dentro del sistema climático que se puede o no producir en ciclos temporales como los fenómeno de La Niña o El Niño (ENOS), o también a variaciones en los forzamientos externos determinada como variabilidad externa, como por ejemplo los ciclos de Milankovitch. Para diferenciar este concepto del cambio climático se debe tener en cuenta que la variabilidad climática se refiere a las variaciones en las condiciones climáticas medias, es decir fluctuación del clima durante períodos de tiempo cortos de meses o incluso años, generando comportamientos anormales que pueden causar excesos o déficit de precipitaciones, es decir, son eventos más súbitos y más instantáneos que en otro caso (IPCC, 2014).

2.3 Glaciares

Los glaciares son definidos por Tarbuck & Lutgens (2005) como una gruesa masa de hielo que se origina sobre la superficie terrestre por la acumulación, compactación y

recristalización de la nieve, que fluye hacia abajo ya sea por deformación interna o por deslizamiento de su base, que se delimita por la topografía que le rodea como por ejemplo, las laderas de un valle o los picos alrededor del mismo; la topografía de la base rocosa y la pendiente son los factores principales que determinan la dinámica de superficie de un glaciar. Un glaciar se mantiene por la acumulación de nieve en altitudes altas en las llamadas zonas de acumulación, y se equilibra por la fusión de nieve en altitudes bajas o la descarga de agua en el mar en las llamadas zonas de ablación. Entre estas zonas se encuentra la línea de nieves perpetuas que delimita el final de la zona de acumulación y el inicio de la zona de ablación; en este punto se determina que si la ablación es mayor y ésta se eleva, se estaría produciendo un desbalance de masa glaciar. En la actualidad, los glaciares ocupan el 10% de la superficie terrestre (Tarbuck & Lutgens, 2005), sin embargo, en el pasado geológico éstos ocupaban vastas áreas hasta en latitudes medias, llegando a tener hasta miles de metros de espesor. Estos glaciares no solo son una evidencia del pasado geológico palpable, sino que aún siguen siendo modificadores del relieve terrestre por sus dinámicas naturales de arrastre y acumulación de materiales.

2.3.1 Formación del hielo glaciar

La génesis de una masa glaciar, empieza con la precipitación de nieve en lugares donde no se descongela por completo, generando una diferencia positiva entre la nieve que cae y la que se derrite. Luego de que se cumplen estos requisitos, la nieve debe seguir un proceso de transformación que empieza con la nieve común, con su estructura en copos de nieve, siguiendo a convertirse en nieve granular, luego en neviza y por último en hielo glaciar (Ver Figura 3).

Figura 3. Representación del proceso de conversión de la nieve recién caída en hielo glaciar.



Fuente: Ciencias de la Tierra de Tarbuck & Lutgens (2005).

Cuando las condiciones anteriores se consiguen, la acumulación de los copos o cristales de nieve en formas hexagonales empieza su transformación. Cuando el aire empieza a pasar por los espacios entre cristal y cristal, los extremos de estos se evaporan condensando un poco de vapor de agua en su centro; de esta forma adquieren una estructura más densa, pequeña y similar a una esfera. Con repetición del proceso anterior, esta nieve granular, más esponjosa y ligera, expulsa todo el aire y se convierte en una mucho más densa y consistente, con granos más pequeños y más juntos, lo que es llamada neviza. Por último, la presión ejercida por la superposición de más nieve verticalmente hace que esta neviza se compacte lo suficiente como para que forme una masa sólida, necesitando hasta 50 metros de profundidad para que los cristales de hielo modifiquen su estructura y se unan en una sola cadena.

2.3.2 Tipos de glaciares

No existe una forma única de clasificar los glaciares; sin embargo, autores como Tarbuck y Lutgens (2005) tienden a categorizarlos considerando el paisaje en el que se manifiestan, y en otros casos según su expresión superficial. En la tabla 3 se presenta de forma resumida los tipos de glaciares y sus características más importantes, según los mencionados autores.

Tabla 3. Descripción de los diferentes tipos de glaciares.

Tipo de glaciar	Descripción
De Valle o Alpinos	Son los que se presentan en zonas montañosas elevadas, los cuales siguen el camino de cursos de agua que anteriormente corrían por ahí. Cada glaciar es en realidad una corriente de hielo, que se encuentra entre unas paredes rocosas, que fluye hacia abajo desde la zona de acumulación en las cimas de las montañas. En general, la longitud de estos glaciares es mucho mayor que su anchura, que puede ser desde unos cuantos cientos de metros hasta decenas de kilómetros.
De Casquete	Son los glaciares que se han consolidado en las zonas de la tierra que no tienen mucho impacto de la radiación solar, actualmente el término se restringe para catalogar solo dos masas que alcanzan éste estatus, pues son a una escala mucho mayor que los glaciares Alpinos y los tropicales. Aunque en el tiempo geológico existieron muchos más de estos, la variabilidad natural del sistema ha hecho que sólo los polos sean aptos para albergar este tipo de glaciares. El primer lugar lo ocupa Groenlandia en el norte del planeta, cubierta con 1.7 millones de kilómetros cuadrados y 1500 metros de espesor de hielo. En segundo lugar se encuentra la Antártida, con 13.9 millones de metros cuadrados de hielo y más de 4000 metros de espesor máximo, que termina con los glaciares catalogados como de casquete en nuestro planeta Tierra, que en sumatoria constituyen casi el 10% de la superficie del mismo.
De Meseta	Este tipo de masa glaciar se sitúa generalmente en paisajes de mesetas elevadas, asemejándose a las plataformas glaciares derivadas de los grandes casquetes, que cubren el paisaje pero no en grandes escalas como las estructuras continentales.

De Piedemonte	Estos glaciares ocupan las tierras bajas de las bases de montañas escarpadas, los cuales son formados cuando uno o más glaciares Alpinos rebasan las paredes de confinamiento de los valles en los cuales están depositados. Estos glaciares también son llamados comúnmente como glaciares de pata de elefante, por su inusual forma.
De Desbordamiento	Estas estructuras son también llamadas lenguas glaciares, las cuales se desprenden de un casquete polar o un glaciar de casquete, fluyendo colina abajo extendiéndose hacia afuera de las grandes masas. Estas lenguas son glaciares de valle producidos por el movimiento desde una gran masa, a través del terreno escarpado hasta llegar al mar, en donde se extienden formando plataformas glaciares flotantes, produciendo en algunos casos una generosa cantidad de icebergs.

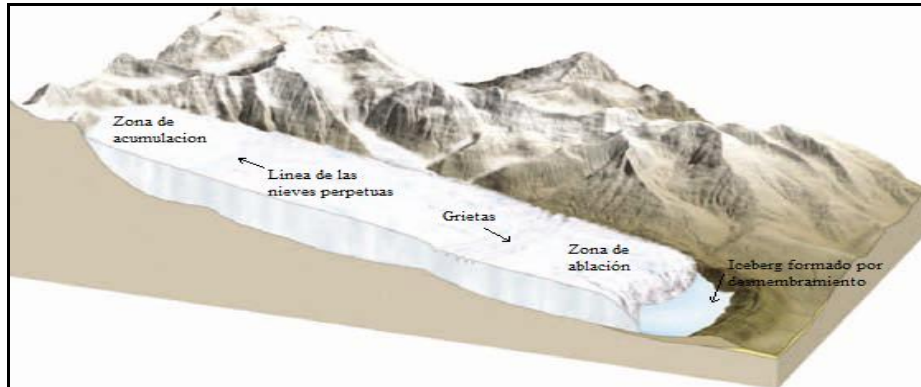
2.3.3 Dinámica glaciar

Según Tarbuck & Lutgens (2005), la dinámica de un glaciar está determinada fundamentalmente por los procesos mencionados a continuación:

- La acumulación de nieve y hielo en la cumbre del glaciar.
- El descenso o descarga de esta masa de hielo hacia la parte inferior del glaciar.
- La ablación o derretimiento del hielo.
- La formación de corrientes de agua por el deshielo o el transporte del hielo y agua evaporada y lanzada a la atmósfera.

El proceso de acumulación depende directamente de todos los fenómenos que llevan a un aumento de la masa neta de glaciar. La nieve acumulada en esta zona es transformada en neviza que es la nieve antigua que se ha compactado con el tiempo y finalmente convertida en hielo sólido. La ablación incluye todos los fenómenos que provocan una pérdida de la masa del glaciar (CAN, 2007), determinada principalmente en la llamada zona de ablación como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4. Representación del flujo glaciar desde la zona de acumulación a la de ablación.



Fuente. Tarbuck & Lutgens (2005).

Dado que los glaciares tienden a equilibrar o estabilizar la acumulación y ablación de su masa, ésta fluye lentamente desde la zona de acumulación a la de ablación; los cambios en la longitud, la superficie y área de cobertura de un glaciar pueden producirse por alteraciones en los procesos de acumulación y ablación. Por ejemplo, si aumenta la ablación, que es debida normalmente a la fusión del hielo por el calentamiento de la atmósfera, y la acumulación se mantiene estable, la longitud y el área del glaciar disminuyen, pues el equilibrio se ve afectado porque la masa perdida es mayor que la recuperada. En caso contrario, si se incrementa la acumulación y la ablación permanece estable, aumenta el flujo del glaciar y éste crece en superficie y longitud, faldas abajo. La corriente o el torrente glaciar es el agua procedente de la fusión de la nieve y el hielo en la zona de ablación, que provoca una pérdida de masa del glaciar, creando en varias ocasiones las llamadas lenguas glaciares o riachuelos (Tarbuck & Lutgens 2005).

El flujo de hielo sólido de los glaciares se crea a consecuencia principalmente de dos fenómenos fundamentales que son la deformación del hielo y su deslizamiento sobre el lecho de roca que cubre. Estas dos condiciones se combinan para dar lugar al transporte de toda la masa de hielo contenida en el glaciar. Para comprender lo que es la deformación del hielo, lo tomaremos como un material viscoso que si se le inclina lentamente, empezará a descender por efecto de la gravedad y se deformará, creando una acumulación en el valle y un adelgazamiento en la cumbre. El deslizamiento glaciar es el lento desplazamiento que

sufre la masa de hielo sobre el lecho inclinado de roca o detritos en el que se aposenta; esto se presenta porque los glaciares en su mayoría se crean en la cima de una montaña, con condiciones de inclinación muy pronunciadas, haciendo que la fijación de la masa sea más compleja dependiendo del peso que ésta posea. En la mayoría de los glaciares, la variable de deslizamiento es más importante que la de deformación interna, pues es más común que ocurran avalanchas o lahares a que se modifique el estado del mismo; además, el agua en las capas más profundas reduce la fricción del glaciar y por ende su fijación a la montaña se hace más débil, aumentando el factor de deslizamiento (Tarbuck & Lutgens 2005).

El balance de masa de un glaciar es la diferencia que hay entre la masa de hielo acumulada por las nevadas, y la masa de hielo perdida por el derretimiento o la fracturación del hielo en un determinado lapso de tiempo, más comúnmente determinada a lo largo del año (CAN, 2007).

En la temporada de verano o de sequía los glaciares se reducen en el extremo final (parte baja) como consecuencia del deshielo y la ablación, mientras que en las temporadas de invierno o de lluvias las nuevas precipitaciones de nieve se van uniendo al hielo que no se derretió durante el verano anterior. En este sentido, si en el transcurso del año se forma más hielo en la zona de acumulación del que se derrite en la zona de ablación, el glaciar tendrá un balance de masa positivo y crecerá en área y volumen. Si la cantidad de hielo desaparecida en la zona de ablación supera la cantidad acumulada en la parte superior del casquete, el glaciar tendrá un balance de masa negativo y decrecerá, perdiendo área y volumen. Las variaciones en el balance de masa de un glaciar se expresan en términos de longitud, volumen y área.

2.3.4 Los glaciares intertropicales

Estas coberturas heladas están presentes en algunos países de la región tropical, entre los cuales se encuentran Uganda, Kenia y Tanzania en África; Indonesia en el continente Asiático y por América, empiezan en el norte desde México pasando a Colombia,

Venezuela, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile. En la comunidad Andina se alberga el 95% de las masas glaciares intertropicales presentes en el globo, que cubren en la actualidad aproximadamente 2.000 km², de las cuales Perú posee el mayor porcentaje con 1.370 km², seguido de Bolivia con 393 km², Ecuador con 79 km², 76 km² para la República de Colombia y por último, con solo 1.8 km², la República Bolivariana de Venezuela (CAN, 2007)

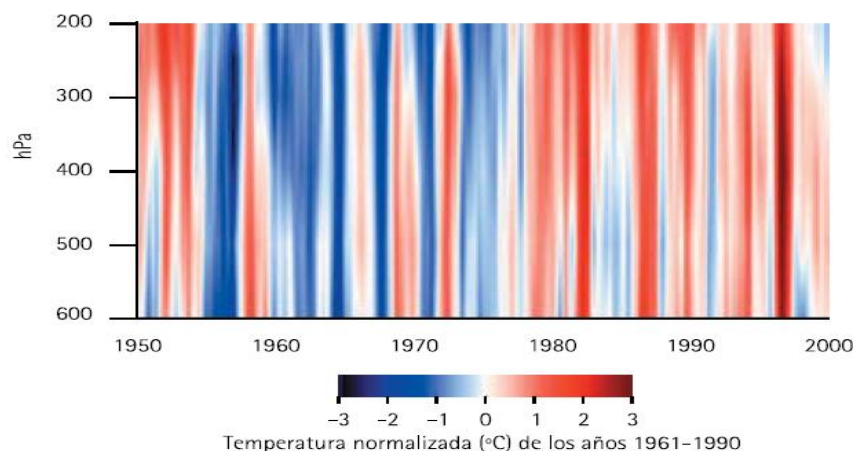
La importancia de éstos glaciares se determina principalmente por el abastecimiento de agua de las cuencas hídricas de los ríos que desde ellos se desprenden. Casi todos éstos glaciares se encuentran en países que están en vías de desarrollo, lo que hace que las comunidades dependan en gran medida de los servicios que les presta el medio natural en el que viven. Ciudades como La Paz, Quito y Lima, son beneficiarias directamente del control de la provisión que realizan los mecanismos propios de los glaciares de carga y descarga de agua, la cual les asegura a estas ciudades el suministro del líquido en las temporadas de sequías y lluvias, y la recarga del mismo en el mantenimiento del balance de masa en el futuro.

Según los investigadores de la CAN, en la montaña de Chacaltaya en La Paz solía existir un glaciar del mismo nombre hasta hace una década. La desaparición de éste se dio por el acelerado cambio en el régimen de lluvias y temperaturas, mayoritariamente atribuido al aumento en la frecuencia del fenómeno del Niño en el pacifico ecuatorial, que se vio reflejado en el estudio realizado por la Comunidad Andina de Naciones, donde se especifica que desde el año 1976 con el llamado Shift del Pacifico o cambio de fase del Pacifico, se generó una cantidad mayor de eventos de El Niño en proporción a La Niña, en una cantidad de tiempo menor (Ver Figura 5).

El cambio climático y sus implicaciones en los glaciares intertropicales han sido bastante estudiados en países como Bolivia y Perú, desde la descripción general de un glaciar hasta el análisis del retroceso de los mismos. Estos glaciares poseen características que los hacen únicos, por lo que se hace de mucho interés el estudio de ellos y sus dinámicas. En la

actualidad, las áreas de glaciares en el trópico ascienden a 2.500 km², de los cuales casi el 99% se encuentra en los Andes (CAN, 2007).

Figura 5. Frecuencia de los episodios de El Niño y La Niña desde 1950 hasta 2000.



Fuente: NOAA (NCEP- NCAR), (2001).

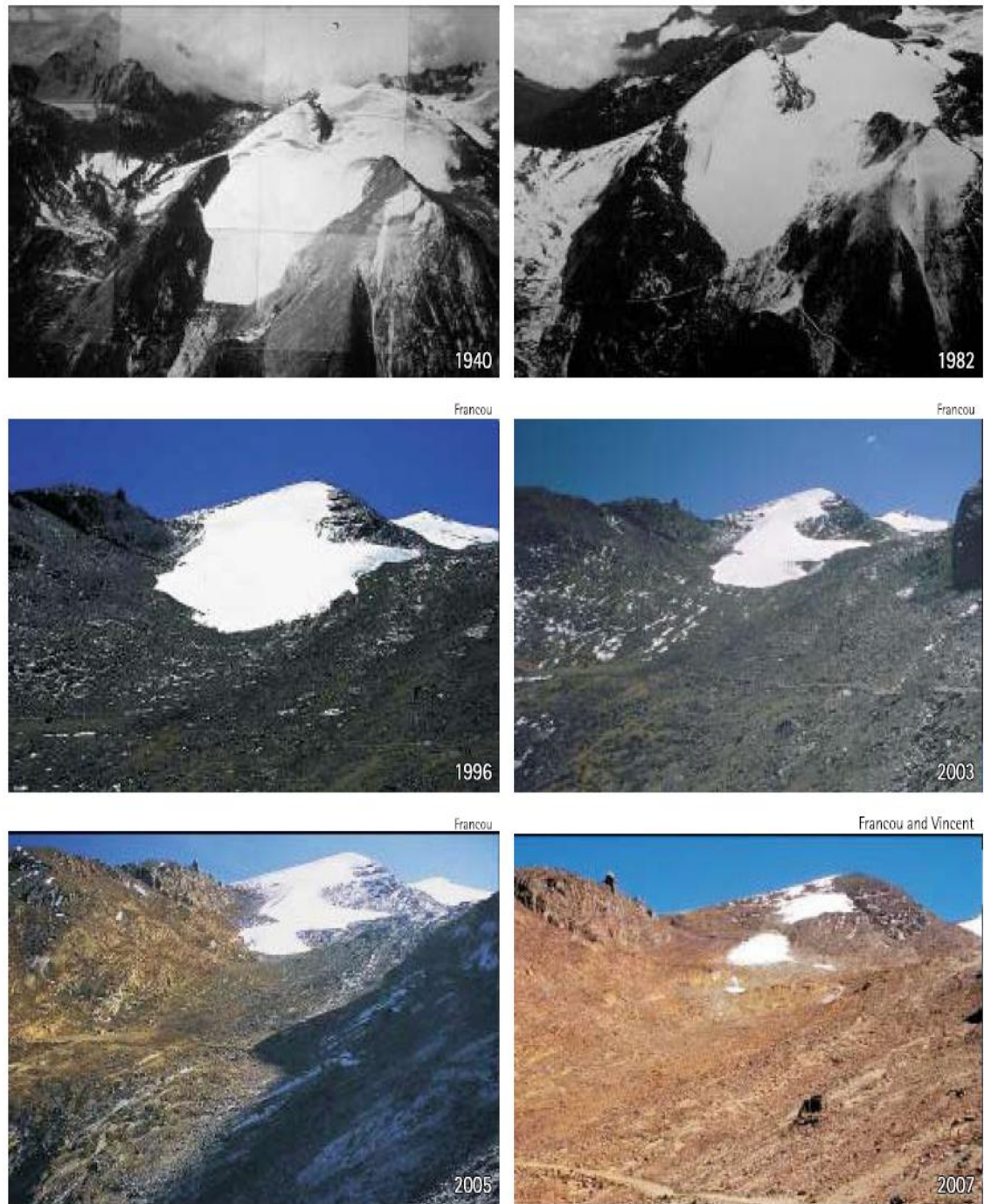
Por su ubicación, estos glaciares juegan un papel importante en el manejo del recurso hídrico en las zonas aledañas que en muchos casos son lugares en los cuales las lluvias son bastantes escasas, además de actuar como reguladores del ciclo hidrológico en casi todas las regiones andinas. Estudios de diferentes entidades, como el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño o CIIFEN, han evidenciado el aumento de la temperatura en la zona Andina tropical, que se habría acelerado desde los años 70 del siglo pasado. La temperatura a nivel del suelo muestra un incremento promedio de 0.15° C por década desde los años 50, a diferencia del intervalo entre 1974 y 1998 donde el incremento fue de 0,32 a 0,34° C (CAN, 2007).

Diversas estimaciones prevén el aumento de la temperatura en la zona andina, sobre todo por encima de los 4.000 msnm, lo cual determina un panorama negativo para los pocos nevados que aún continúan “con vida”. Si las investigaciones son correctas, solo las cumbres más elevadas (5.500 msnm) estarían cubiertas a finales del presente siglo (CAN, 2007).

De acuerdo a estos estudios realizados por la CAN en el año 2007, el glaciar Chacaltaya para el año 1940 tenía una extensión de 22 has a pesar de su poca altitud, pero desde entonces empezó a sufrir pérdidas que no lograron ser compensadas. Para 1963, el glaciar se había reducido hasta 19 has y en 1983, solo poseía 14 has de superficie, y a partir de éste año, las pérdidas resultaron mayores en periodos de tiempo más cortos (Ver Figura 6). Desafortunadamente, el glaciar se encuentra hoy extinto, generando no solo un problema para las comunidades cercanas, sino provocando una alerta en los científicos del mundo y sobre todo de la región, pues este es un claro ejemplo de que el cambio climático sí está afectando los glaciares; de que la recurrencia de los fenómenos de variabilidad climática es cada vez mayor, tanto en etapa cálida como fría, lo que hace pensar que hacia el futuro, si las condiciones actuales se mantienen estables, no quedarán muchos glaciares sobre nuestras montañas.

El cambio climático en los Andes tiene algunas particularidades regionales bastante marcadas, una de ellas es la relación entre la variabilidad del clima y el Fenómeno “El Niño”, o ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Esta particularidad hace que sea indispensable incluir en la discusión de las variabilidades de clima en las zonas andinas, los fenómenos propios de la variabilidad natural y la clara tendencia al recalentamiento que vienen experimentando estas zonas.

Figura 6. Evolución del glaciar Chacaltaya (Bolivia) entre los años 1940 y 2007.



Fuente. CAN (2007).

2.4 Teledetección

La técnica de la teledetección desde su invención, ha ayudado a potenciar la objetividad de los estudios ambientales alrededor del mundo, pues se ha podido llegar a lugares remotos donde el ser humano no ha podido alcanzar. Por ello, para esta investigación las herramientas derivadas del proceso de la teledetección serán primordiales a la hora de alcanzar resultados satisfactorios.

La teledetección se puede definir como la captación y el procesamiento de información recibida a distancia, sin que exista necesariamente un contacto físico con lo examinado (Chuvieco, 2008). Desde principios del siglo pasado, se utilizaban las imágenes aéreas en operaciones militares de inteligencia, donde por medio de la interpretación de fotografías, se intentaba sacar ventaja en las contiendas bélicas, por lo que es considerado como el precedente de la teledetección moderna. En este sentido, y luego del desarrollo de las tecnologías de la información, la teledetección se embarcó en la tarea de interpretar dichas imágenes más allá de lo que nos ofrece el espectro electromagnético visible (Seco Hernández, 2002); es decir los espacios infrarrojo y térmico.

En general, se usan los sensores ópticos y térmicos. Los primeros se basan en el aprovechamiento de la interacción entre la luz reflejada por una fuente externa (Sol) y los objetos de estudio para determinar sus propiedades y los segundos, capta la radiación térmica emitida por los objetos estudiados y la transforma en impulsos eléctricos.

El procesamiento y la interpretación de imágenes obtenidas a partir de la percepción remota se entienden como la utilización de sistemas, procesos y técnicas que permiten el análisis de la imagen más allá de lo que aparenta mostrar. Esta técnica es de gran ayuda para estudios como este, pues se puede estudiar un área bastante amplia con solo una imagen y en simultáneo se pueden observar y comparar cambios más eficazmente, del pasado a la actualidad, con una serie de imágenes (Chuvieco, 2008).

Desde el punto de vista de la aplicación de esta técnica, se tiene como objetivo reconocer las características principales de un fenómeno existente en superficie, o simplemente se puede realizar una caracterización del entorno observado. Todos los elementos que son observados poseen una firma espectral propia que es la manera en la cual el sensor percibe cada uno de ellos; este es el punto de partida para identificarlos más claramente, pues todos estos elementos tienen comportamientos espectrales diferentes que en ningún caso se repiten. Para la identificación de dichos elementos, es necesario proveerse de conocimientos que ayuden al entendimiento del funcionamiento de las leyes que rigen el proceso de la teledetección. Según Castaño, Ruiz y Vela (2010), estos procesos pueden dividirse en cuatro:

- La radiación electromagnética como principal fuente de energía.
- La interacción de la energía electromagnética con la atmósfera terrestre.
- La interacción de la energía electromagnética con los elementos en superficie.
- La obtención de la información mediante sensores remotos.

De acuerdo con lo anterior, para que la observación desde el sensor satelital se pueda realizar satisfactoriamente, se necesita una interacción directa entre el satélite y los objetos, es por esto que los tres elementos principales que componen el proceso de la teledetección son el sensor, el flujo energético y lo observado, lo que permite que el sensor adquiera la información necesaria desde un lugar remoto. Dentro de la interacción radiación - objetos, se comprenden tres procesos que se derivan de las características intrínsecas de lo observado y de la cantidad de energía que pueden recibir. Estos procesos pueden seguir tres caminos:

- La reflexión que es el fenómeno que se presenta cuando la radiación recibida por el objeto es devuelta al espacio.
- Transmisión que es cuando la radiación recibida se transmite hacia los objetos situados detrás o debajo.
- La absorción, que se presenta cuando la radiación incrementa la energía del objeto.

2.4.1 La imagen satelital

La imagen satelital es un compendio o matriz de píxeles con valores digitales, según la cantidad de energía reflejada o emitida por los objetos, que son capturados por un sensor ensamblado a un satélite que orbita la tierra. Esta imagen generalmente se encuentra representada en formato *Raster* o de celdas y los valores digitales dependen de la sensibilidad del sensor (número de bits). Para el caso de las imágenes a usar en este trabajo, de 8 bits, los tonos de grises variarían entre 0 (negro) y 255 (blanco). Dentro del proceso de la teledetección se requiere el uso de cuatro importantes factores que determinan la calidad de la información que se está usando; resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Reuter, 2009).

2.4.1.1 Resolución Espacial

Corresponde al campo de visión instantáneo del sensor, que determina el área de cada pixel. Mientras menor sea esta, la imagen tendrá más definición pues tendrá mayor disposición de píxeles para representar el objeto observado. Es medida comúnmente en metros y depende directamente de la altura o distancia del sensor hasta el objeto y de la longitud focal del sensor.

2.4.1.2 Resolución Espectral

Esta indica cuántas y que rango poseen las bandas en las que el sensor puede captar imágenes. Un sensor es más útil si posee mayor cantidad de bandas, pues puede captar por sí solo la caracterización espectral de un número mayor de cubiertas. Igualmente, estas bandas deben ser lo suficientemente angostas para poder obtener una buena señal de acuerdo a las regiones del espectro electromagnético, pues si las bandas son muy anchas, pueden registrar un valor digital promedio que no identifique realmente lo que se está observando, generando un sesgo en la captación de la información.

2.4.1.3 Resolución radiométrica

Esta comprende la sensibilidad del sensor, también llamado rango dinámico o número de nivel digital usado para la digitalización de la información o bits por pixel. La mayoría de las ocasiones cuando se tiene un mayor número de niveles digitales, más detallada será la información capturada.

2.4.2 La teledetección del hielo y la nieve

El agua presente en la naturaleza posee tres fases. Dentro de estas fases se encuentra la congelación, que es cuando el agua se transforma en hielo, este punto en condiciones normales es de aproximadamente 0°C en nuestro planeta. Estos procesos requieren una gran cantidad de energía para que puedan producirse, por ejemplo, cuando se funde el hielo y se transforma en agua, se requieren aproximadamente 334 julios por cada gramo de hielo (ESA, 2014), esto es equivalente a la energía gastada por un humano al caminar 50 metros. La energía que se absorbe o libera durante un cambio de fase (por ejemplo, de agua a hielo, o de agua a vapor) se denomina calor latente. Todos los procesos de fusión, evaporación (cambio de fase de agua a gas) y sublimación (cambio de fase de hielo a gas) provocan el enfriamiento del espacio directamente circundante de donde se absorbe la energía. Por el contrario, todos los procesos de condensación (cambio de fase de gas a líquido), congelación y deposición (cambio de fase de agua a hielo) provocan el calentamiento de dicho espacio. Las consecuencias de las características físicas del hielo y, en especial, de los glaciares, son cruciales en la Tierra pues de ellos depende en gran medida, muchos de los procesos climáticos (ESA, 2014).

Los glaciares no se funden por completo de inmediato cuando se exponen a temperaturas superiores a 0 °C. Se derriten lentamente porque el hielo debe absorber la energía de su entorno. Por lo tanto, los glaciares o sus partes sólo pueden mantenerse durante un tiempo determinado en condiciones medioambientales superiores a 0 °C (ESA, 2014).

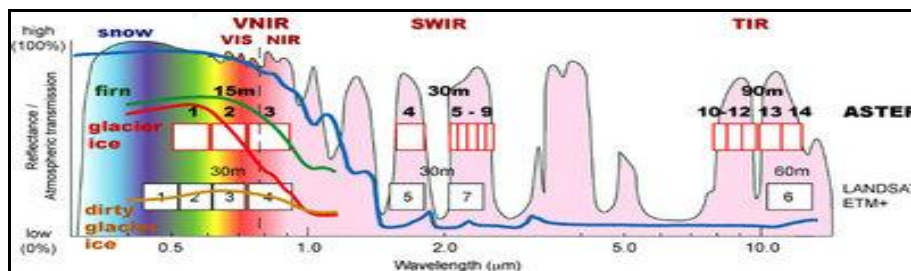
El derretimiento de hielo a 0 °C para convertirse en agua a 0 °C requiere tanta energía (calor latente) como, por ejemplo, para calentar agua de 0 °C hasta unos 80 °C. Por lo tanto, el hielo puede ser bastante estable si sólo se dispone de una energía limitada para fundirlo (ESA, 2014).

2.4.2.1 Propiedades espectrales del hielo y la nieve

Las propiedades ópticas de un material influyen en la reacción a la radiación al impactar en su superficie. Cada material posee su propia característica espectral debido al grado de reflexión, absorción y transmisión a distintas longitudes de onda de la radiación recibida (ESA, 2014).

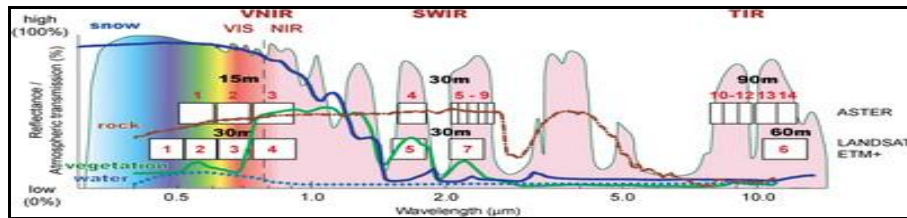
El hielo y la nieve suelen mostrar una gran reflexión en longitudes de onda visibles (VIS; aproximadamente 0,4 – 0,75 μm), menor reflexión en NIR (*Near InfraRed*, Infrarrojo cercano), longitud de onda aproximada de 0,78 - 0,90 μm) y reflexión muy baja en SWIR (*Short Wave InfraRed*, Infrarrojo de onda corta, longitud de onda aproximada de 1,57 - 1,78 μm). La baja reflexión del hielo y la nieve en SWIR está relacionada con su contenido microscópico de agua líquida (el conjunto de VIS y NIR se suele abreviar como VNIR). Sin embargo, la reflexión característica varía en función de la composición del material (Figuras 7 y 8) y, por lo tanto, es distinta en la nieve, nieve firme o parcialmente compacta, hielo de glaciar o hielo glaciar sucio (ESA, 2014).

Figura 7. Curvas de reflectancia de la nieve - hielo, según su estado..



Fuente. http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEM4OL22ECH_0.html.

Figura 8. Curvas de reflectancia de la nieve, vegetación, agua y roca.



Fuente. http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEM4OL22ECH_0.html

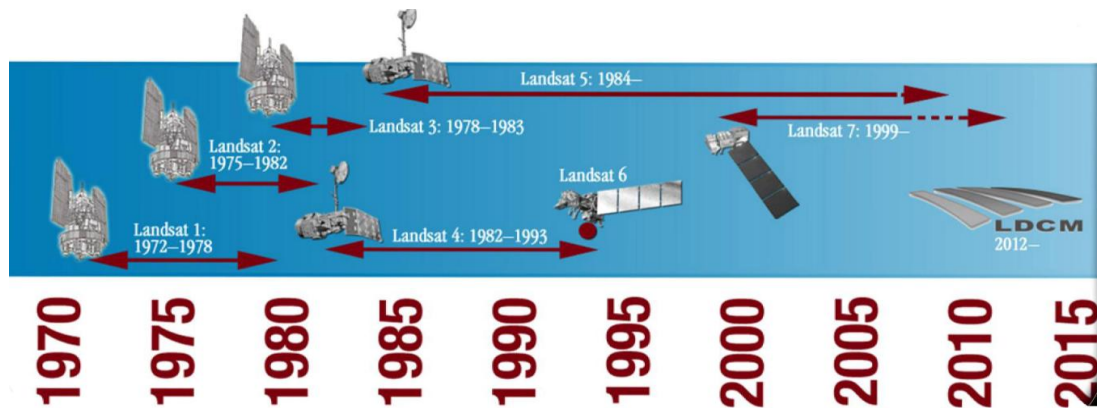
Las zonas coloreadas en las Figuras anteriores indican el grado en que la atmósfera terrestre permite el paso de radiación electromagnética de una longitud de onda determinada (ventana atmosférica). Las zonas con alta transmisión atmosférica son adecuadas para observar la Tierra desde el espacio. Los rectángulos numerados indican las bandas espectrales en las que los sensores, en este caso ASTER y *Landsat Thematic Mapper*, registran la radiación (ESA, 2014).

Las curvas de reflectancia de la nieve *FIRN* y del hielo glaciar están interrumpidas por las longitudes de onda más grandes porque se superponen con la curva de reflectancia de la nieve. La curva de reflectancia del hielo glaciar sucio también se interrumpe a mayores longitudes de onda dado que la reflectancia varía mucho en función del tipo y la cantidad de residuos. Por lo tanto, no es posible trazar una curva de reflectancia general del hielo glaciar sucio en longitudes de onda mayores (ESA, 2014).

- **La Constelación LandSat**

Además de los datos climáticos, en ésta investigación se utilizaron imágenes satelitales de LandSat 5 y LandSat 8 OLI, pues por medio de la aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes, fue como se logró determinar el área y la altitud del glaciar en el año 1985 y 2014.

Figura 9. Cronología de la constelación LandSat.



Fuente. USGS (2010).

Para el LandSat 5 se dispuso el sensor TM (Thematic Mapper), que es un sensor de barrido multiespectral, fue creado principalmente para poder tener una mayor resolución espacial, además de lograr una mejor diferenciación entre las unidades observadas. La diferencia de este sensor frente al MSS, es que éste posee mayor confiabilidad geométrica y una mayor precisión radiométrica. Éste sensor posee siete bandas que funcionan al mismo tiempo, tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el termal. Para las seis primeras bandas la resolución espacial es de 30 metros y para la termal es de 120 (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Características del satélite LandSat 5.

Modo	Resolución espacial (m)	Rangos espectrales		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Multiespectral	30	Banda 1 Azul	0.45 - 0.52	8 BITS	16 días
		Banda 2 Verde	0.52 - 0.60		
		Banda 3 Roja	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2	1.55 - 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio	2.08 - 2.35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico	10.4 - 12.5		

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por USGS (1985).

El satélite LandSat 7 posee una órbita heliosincrónica, en la cual sobrevuela el mismo lugar de la superficie terrestre a la misma hora. La diferencia de este satélite a los anteriores, es que el LandSat 7 tiene la capacidad de almacenar hasta 378 gb de información, lo que equivale a casi 100 imágenes. El sensor también envía alrededor de 520 imágenes por día, haciendo un recorrido por toda la superficie en 15 días realizando 232 orbitas. El instrumento principal ensamblado en su plataforma es denominado ETM+ o *Enhanced Thematic Mapper Plus*, una versión más avanzada del ETM que se había instalado en el LandSat 6. Lamentablemente, este sensor se descompuso desde el año 2003 y presenta un bandeo en las imágenes lo que las deja inutilizables (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Características del satélite LandSat 7.

Modo	Resolución espacial (m)	Rangos espectrales		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Multiespectral	30	Banda 1 Azul	0.45 - 0.52	8 BITS	16 días
		Banda 2 Verde	0.52 - 0.61		
		Banda 3 Roja	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.78 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2	1.55 - 1.75		
		Banda 6 Infrarrojo medio	2.09 - 2.35		
Pancromática	15	Banda 8	10.4 - 12.5		

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por USGS (1999).

El último de la constelación es el LandSat 8 OLI, el cual posee unas severas mejoras en comparación a los anteriores. Este dispositivo fue lanzado a órbita el 11 de febrero de 2013 y tuvo un periodo de prueba de aproximadamente 100 días, haciendo confiables las capturas luego de mayo del mismo año. Posee varias características similares a su predecesor, la órbita es igualmente heliosincrónica, a una altura aproximada de 705 km sobre la superficie y con tiempo de revisita de 16 días. Posee dos sensores principales: Operational Land Imager – OLI y Thermal Infrared Sensor – TIRS. Las bandas espectrales del sensor OLI, similares al sensor ETM + del Landsat 7, proporcionan una mejora sustancial de los instrumentos de Landsat anteriores, con la adición de dos nuevas bandas espectrales: un canal visible azul profundo en la banda 1, diseñados específicamente para los recursos hídricos y la investigación de las zonas costeras y un nuevo canal infrarrojo en la banda 9, para la detección de nubes cirrus. Por último, dos bandas térmicas (TIRS) capturar datos con un mínimo de 100 metros de resolución (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Características del satélite LandSat 8.

Modo	Resolución espacial (m)	Rangos espectrales		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Pancromática	15	Banda 8 Pancromática	0.52 - 0.90	12 BITS	16 días
Multiespectral	30	Banda 1 Aerosol costero	0.43 - 0.45		
		Banda 2 Azul	0.45 - 0.51		
		Banda 3 Verde	0.53 - 0.59		
		Banda 4 Roja	0.64 - 0.67		
		Banda 5 Infrarrojo cercano	0.85 - 0.88		
		Banda 6 SWIR 1	1.57 - 1.65		
		Banda 7 SWIR 2	2.11 - 2.29		
		Banda 9 - Cirros	1.36 - 1.38		
	100* (30)	Banda 10 Infrarrojo térmico TIRS 1	10.6 - 11.19		
	100* (30)	Banda 11 Infrarrojo térmico TIRS 2	11.50 - 12.51		

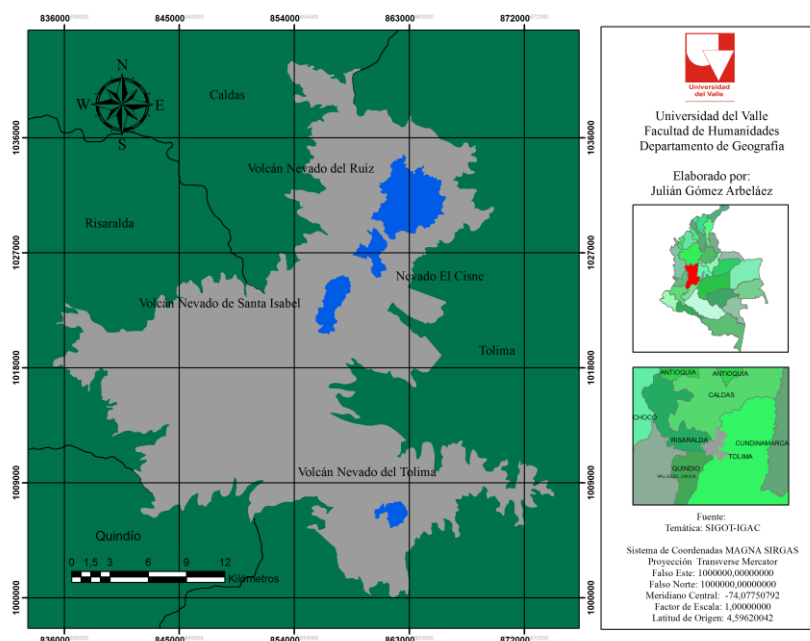
Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por USGS (2015).

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El Parque Nacional Natural Los Nevados se encuentra localizado geográficamente en la Cordillera Central de la República de Colombia, en sus vertientes oriental y occidental altas, con alturas que oscilan entre los 2.600 y 5.321 metros sobre el nivel del mar (msnm). En el Mapa 1, se muestran los tres principales nevados del parque, el Ruiz, Santa Isabel y Tolima, además de El Cisne, que no se cataloga como nevado, ya que su cobertura helada solo es temporal en algunos meses del año, pero se nombra eco- sistémicamente como alto orobioma de los Andes, al igual que los nevados (PNN, 2002).

Mapa 1. Localización del Volcán Nevado del Ruiz en el PNN Los Nevados de Colombia.



Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por PNN de Colombia (2002).

Éste parque comprende un área de aproximadamente 583 km², en la jurisdicción de cuatro departamentos, el departamento de Caldas, con el municipio de Villamaría; el departamento de Risaralda, con los municipios de Santa Rosa de Cabal y Pereira; el departamento del

Quindío con el municipio de Salento y por último, el departamento del Tolima, con un número mayor de municipios como Ibagué, Anzoátegui, Santa Isabel, Murillo, Villahermosa, Casabianca y Herveo. El municipio que más área tiene en el parque es Santa Rosa de Cabal, y el que menor porcentaje posee es Herveo en el Tolima (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Distribución de áreas y porcentajes del PNN Los Nevados.

Departamento	Municipio	Area (hectáreas)	Porcentaje
Caldas	Villamaría	8074	13.9
	TOTAL	8074	13.9
Risaralda	Santa Rosa	11328	19.4
	Pereira	8611	14.8
	TOTAL	19939	34.2
Quindío	Salento	1714	2.9
	TOTAL	1714	2.9
Tolima	Ibagué	5603	9.6
	Anzoátegui	6378	10.9
	Santa Isabel	4367	7.5
	Murillo	8966	15.4
	Villahermosa	1434	2.5
	Casabianca	1481	2.5
	Herveo	344	0.6
	TOTAL	28573	49.0
TOTAL PARQUE		58300	100

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por PNN de Colombia (2002).

Este Parque fue creado mediante el Acuerdo 15 de 1973, dentro de las facultades expresadas en el Decreto 2420 de 1968 del entonces encargado de la gestión ambiental en nuestro país, el Instituto Nacional de Recursos Naturales - INDERENA. El instituto delimitó en ese tiempo un área de aproximadamente 38.000 hectáreas, para ser declaradas como Parque Nacional Natural Los Nevados. Dicho acuerdo fue ratificado por resolución ejecutiva N° 148 de Abril de 1974. Posteriormente, una revisión cartográfica realizada en el

año 1985, logró determinar que el área total determinada en el acuerdo 15 de 1973 correspondía a 58.300 hectáreas.

El Parque posee gran valor regional y local, dentro de las cuales se puede contar la característica de eje articulador del corredor ambiental de la Cordillera Central desde el Páramo de Sonsón en el sur oriente de Antioquia, continuando con los páramos de San Félix en Caldas y finalizando en el sur por el páramo de Chili en el municipio de Génova, ubicado en el Parque Nacional Natural Las Hermosas. Este parque hace parte de las áreas protegidas del país, donde se promueve la necesidad de incluir todas estas regiones naturales en el desarrollo de la región, por medio del ordenamiento del territorio; actualmente se lleva el proceso del Sistema Regional de Áreas Protegidas para la Ecorregión del Eje Cafetero, la cual tiene un objetivo a largo plazo para cumplir hasta el año 2020 con la consolidación de un sistema de áreas protegidas donde la biodiversidad sea representada satisfactoriamente y donde persistan a largo plazo sus elementos constitutivos, los procesos ecológicos y evolutivos que la sustentan y los servicios ambientales que brindan a las comunidades. La importancia más relevante es que de este Parque depende el abastecimiento de todas las fuentes hídricas que bañan su zona de influencia, donde hay poblaciones como Pereira, Armenia y Santa Rosa de Cabal, que hacen uso del servicio ambiental que provee (PNN, 2002).

3.1.1 Descripción física del Parque

El macizo Ruíz - Tolima es constituido por ocho volcanes principales, entre los 30 cráteres y cuellos volcánicos de la cordillera Central (PNN, 2002). Éste complejo comprende, entre las latitudes 4°30' N y 5° 15' N, los volcanes cerro Machín, el Nevado del Tolima, el Páramo de Santa Rosa, el Paramillo del Quindío, el grupo de domos del Nevado de Santa Isabel, el Paramillo del Cisne, La Olleta, el Nevado del Ruiz, y por último el volcán Cerro Bravo, y otros dos volcanes inactivos: El Contento en el norte del complejo y el Páramo de Herveo al noroccidente del Cerro Bravo. Considerándolo todo, este macizo posee dentro de sus límites seis cráteres principales con tres volcanes activos: El Cerro Machín, el Nevado del Ruíz y el Nevado del Tolima. Sobre el lomo de la cordillera Central del país, este

macizo abarca gigantescas mesetas creadas por coladas de lavas espesas generalmente aplanadas. Los derrames de lava andesítica básica, intermedia o ácida recubren alrededor de 1.250 km², con una discordancia obvia sobre el zócalo ígneo-metamórfico pre-neógeno (PNN, 2002).

En términos generales, en el área de este parque se reconoce una asociación de de tres conjuntos topográficos y volumétricos contrastados, y una cumbre constituida por macizos volcánicos entre los 4.500 y 5.400 msnm, de laderas anchas y disectadas con longitud desigual, localizados debajo de las cumbres hasta el Valle del Magdalena en la parte oriental y hasta el Valle del Cauca hacia el Occidente, con pendientes bastante pronunciadas, pero con una serie de pequeños escalonamientos inclinados. El drenaje de la zona es predominantemente subdendrítico y subangular, dependiendo de la estructura y composición de la roca en que se desarrolla. La topografía es abrupta con cerros y divisorias de aguas, simétricas y con rasgos erosivos moderados que se acentúan por efectos del fallamiento y la actividad humana; la cubierta piroclástica presente en varios sitios suaviza esta morfología. Éste parque posee una gran importancia hidrográfica para la región; allí nacen innumerables fuentes de agua que abastecen a la población y a los ecosistemas aledaños. El deshielo producido por las nieves perpetuas origina los cauces iniciales de los ríos que vierten sus aguas en las dos grandes cuencas interiores del país: la del Cauca al occidente y la del Magdalena al oriente (PNN, 2002).

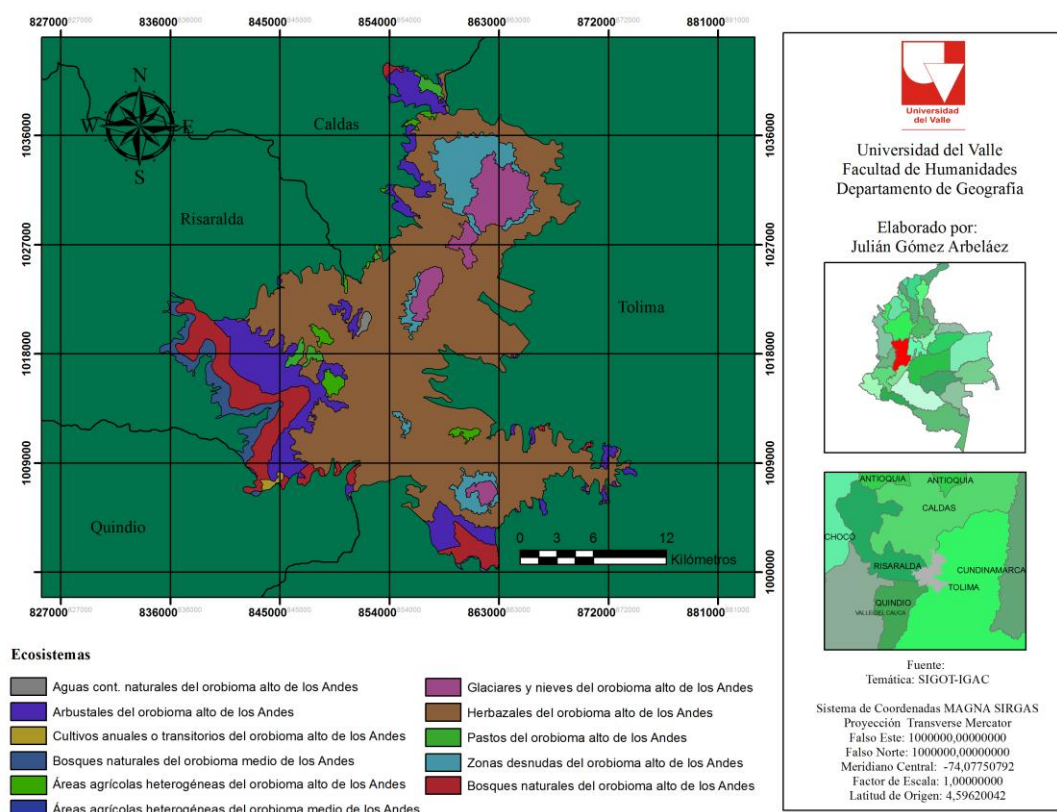
Adicional a lo anterior, la red fluvial de la región se abastece de lagunas de alta cordillera entre las cuales se destacan varias de origen glaciar, y otras como la del Otún que parecen corresponder a antiguos cráteres volcánicos. Otras lagunas están relacionadas con aguas subterráneas o con manantiales, semejando pantanos o depósitos de aguas someras que se desaguan poco a poco, para enriquecer su cauce en la Zona Amortiguadora o de transición. El territorio total del parque de Los Nevados, comprende 10 subcuencas y 19 corrientes de diferentes tamaños y características; seis drenan en la hoya hidrográfica del Magdalena que son Gualí, Lagunilla, Recio, Totare, Frío y Coello, y las cuatro restantes, Chinchiná, Campoalegre, Otún y Quindío que desembocan a la hoya hidrográfica del río Cauca. Los

suelos del Parque Nacional Natural Los Nevados, corresponden al dominio pedogénico ándico mayoritariamente. En gran parte han participado en su formación materiales volcánicos piroclásticos, materiales producto de ablación y acarreo glaciar y materiales que resultan de procesos erosivos recientes y contemporáneos en la faja subnival (PNN, 2002).

3.1.2 Importancia ecosistémica del parque

En el Parque se han identificado cinco ecosistemas naturales, dentro de los cuales se encuentran el bosque sub andino, el bosque alto andino, el páramo, superpáramo y las nieves (Ver Mapa 2). Dentro de estos ecosistemas se encuentra una gran variedad biológica de plantas, aves y mamíferos (PNN, 2002).

Mapa 2. Distribución de los ecosistemas presentes en el PNN Los Nevados de Colombia.



Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por PNN de Colombia (2002).

De acuerdo al mapa anterior, un 4,6% de la superficie del parque corresponde a los ecosistemas nivales denominados como glaciares y nieves del orobioma alto de los Andes, que comprenden los nevados del Ruíz, Santa Isabel y Tolima. Su área total, según la fuente mencionada, es aproximadamente de 2.680 ha (Ver Tabla 8). El superpáramo, llamado en el mapa como las zonas desnudas del orobioma alto de los Andes, se comprende por algunas pocas nieves y cenizas depositadas en las faldas del glaciar hasta el páramo propiamente dicho, además de algunos herbazales, turberas y arbustales abiertos muy disgregados. El páramo o Herbazales del Orobioma alto de los andes, que posee un área estimada de 38.600 ha, contiene dentro de sus componentes más importantes el pajonal, la turbera, el arbustal denso y algunas lagunas. También se especifican los bosques naturales del orobioma alto y medio de los Andes y algo de agua en estado líquido depositada en la laguna del Otún, ubicada hacia el occidente del Nevado de Santa Isabel. Por último se encuentran algunos cultivos transitorios y zonas agrícolas usadas por los habitantes de la zona.

Tabla 8. Ecosistemas presentes en el PNN Los Nevados y su extensión.

Ecosistemas		Área (ha)	% dentro del Parque
Nival	Nieve	2.682	4.6
Súper Páramo	Roca y ceniza	2.740	4.7
	Herbazal	5.947	10.2
	Turbera	408	0.7
	Arbustal abierto	466	0.8
Páramo	Pajonal	38070	65.3
	Turbera	5	0
	Arbustal denso	350	0.6
Acuático	Laguna	175	0.3
Bosque Altoandino	Bosque Altoandino	4723	8.1
Transformados	Pastizal/Cultivo	2740	4.7
TOTAL		58306	100

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por PNN de Colombia (2002).

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Materiales

Para la presente investigación, que consta de dos períodos, se utilizaron los siguientes materiales:

3.2.1.1 Mapas temáticos convencionales (primer período).

Como se ha dicho antes, el presente trabajo toma como base la investigación realizada en el glaciar del Ruiz por Wilfred Linder, publicado en 1987. Este autor produjo un mapa en el cual espacializa el contorno de la masa glaciar para los años 1959 y 1985; sin embargo, para este estudio sólo se utilizó el área determinada por el citado autor para el año 1959. El mapa fue realizado a partir de la interpretación de un total de 185 fotografías aéreas a escala 1:25000 en blanco y negro, tomadas con un cámara gran angular ($C = 153\text{mm}$) disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. En la interpretación de las fotografías el investigador utilizó 76 puntos de control, de los cuales 22 fueron de posición y 54 de altura, distribuidos en toda el área de estudio, para lograr una mejor calidad de los resultados.

3.2.1.2 Imágenes de sensores remotos (segundo período).

Además de la utilización de mapas históricos, en éste trabajo se utilizaron cuatro imágenes satelitales, la primera y la segunda del sensor LandSat 5, la tercera del LandSat 7 y la cuarta del LanSat 8 OLI. Las imágenes fueron obtenidas de acuerdo a la disponibilidad de datos gratuitos del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS. Luego de encontrar algunas imágenes disponibles y con poca nubosidad en la zona de estudio, se escogió entonces para el año 1985, la toma del 13 de marzo, una del 2 de agosto de 1996, del 3 de julio del 2003 y la final, para el año 2014, se escogió la toma del 26 de diciembre. Las fechas extremas (1985 y 2014) fueron escogidas para lograr tener un periodo de tiempo similar al estudio de Linder. Adicionalmente, como la investigación trata de determinar las

condiciones del glaciar por eventos diferentes a las dinámicas volcánicas, se determinó que la primera imagen debería estar antes del 13 de Noviembre de 1985, cuando el volcán del Ruíz hizo erupción, fusionando el 10% de la capa helada del glaciar y arrasando con el municipio de Armero, Tolima. Con las imágenes anteriores se determinó el área y altura del glaciar para los años 1985, 1996, 2003 y 2014 (Ver tabla 9).

Tabla 9. Características de las imágenes satelitales.

Adquisición		LandSat 5	LandSat 5	LandSat 7	LandSat 8
	Fecha	13/03/1985	02/08/1996	03/07/2003	26/12/2014
	Hora UTC	14:49:00	14:34:17	15:07:40	15:19:00
	Hora Local	09:49:00	09:34:17	11:07:40	10:19:00
	Path	9	9	9	9
Georreferenciación	Row	57	57	57	57
	Datum	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
	Elipsoide	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
	Proyección	UTM	UTM	UTM	UTM
Propiedades	Orientación	NUP	NUP	NUP	NUP
	No. de bandas	7	7	8	11
	Resolución espacial	30m	30m	30m	30m
	Formato de salida	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por USGS (1985 y 2014).

3.2.1.3 Datos climáticos

El trabajo realizado por el investigador Wilfred Linder contó con la disponibilidad de promedios mensuales de temperatura desde el año 1959 hasta 1987 (el estudio no reporta valores mínimos ni máximos mensuales de temperatura). Así llegó a establecer, cómo se

comportó la temperatura media para la zona próxima al volcán. Para el segundo periodo que es la parte central de este trabajo, se contó con mayor disponibilidad de datos. Se usaron datos de temperatura mínima y máxima diarias, de 1985 a 2014, de la estación Las Brisas, ubicada dentro del Parque; a partir de las anteriores se obtuvo la media diaria, mensual anual y las mínimas y máximas absolutas mensuales, con los cuales se caracterizó de manera detallada el comportamiento de la variable para los 28 años de la segunda fase del estudio. Estos datos fueron cedidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), los cuales están determinados por medidas de temperatura máxima, mínima y media para una estación presente en el Parque. Se escogió solo la estación Las Brisas ubicada a 4150 msnm de altura (Ver Tabla 10 y Mapa 3), por ser la que tiene mayor altitud respecto a las demás que están dispuestas en el Parque, pues ninguna de las demás supera los 3.500 msnm y es la que está más cerca al glaciar. Adicionalmente, esta estación es la única que se encuentra aún en funcionamiento, de las que usó el investigador Linder en el trabajo que sirve como base de la presente investigación; las demás ya terminaron su vida útil o los datos no están disponibles.

Tabla 10. Características de la estación meteorológica Las Brisas.

I D E A M - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	
Estación: Las Brisas - Cod. 26155150	Sistema de Información Nacional Ambiental
Latitud: 4.54 n	Tipo estación: Tradicional
Longitud: 75.21 w	Entidad: 01 IDEAM
Elevación: 4150 m.s.n.m	Regional 09 – Valle - Quindío corriente Molinos
Dpto de Caldas - municipio de Villamaria	Fecha instalación: Octubre de 1981

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por IDEAM (2015).

Los datos fueron entregados en formatos de archivo plano (.txt), los cuales fueron reacomodados en filas y columnas en formato de hoja de cálculo de Excel. Posteriormente se procedió a realizar un análisis para describir el comportamiento de la temperatura mediante los datos recolectados en la estación.

- **Software R - RClimdex:**

El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) formado conjuntamente por la OMM, el proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), ha propuesto un conjunto de índices de cambio climático útiles en la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima (Karl et al. 1999; Peterson, 2005). Los índices son calculados a partir de las series de datos observados de temperatura y/o precipitación. Los índices de puntos de observación individuales pueden ser posteriormente agregados en series regionales representativas del área geográfica analizada. Los índices del ETCCDI proveen una base teórica común de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta para luego comparar o integrar los resultados de diversas regiones. La Tabla 11 muestra en orden alfabético un resumen de los índices del ETCCDI y su descripción.

Tabla 11. Resumen de los 27 índices extremos de cambio climático del ETCCDI.

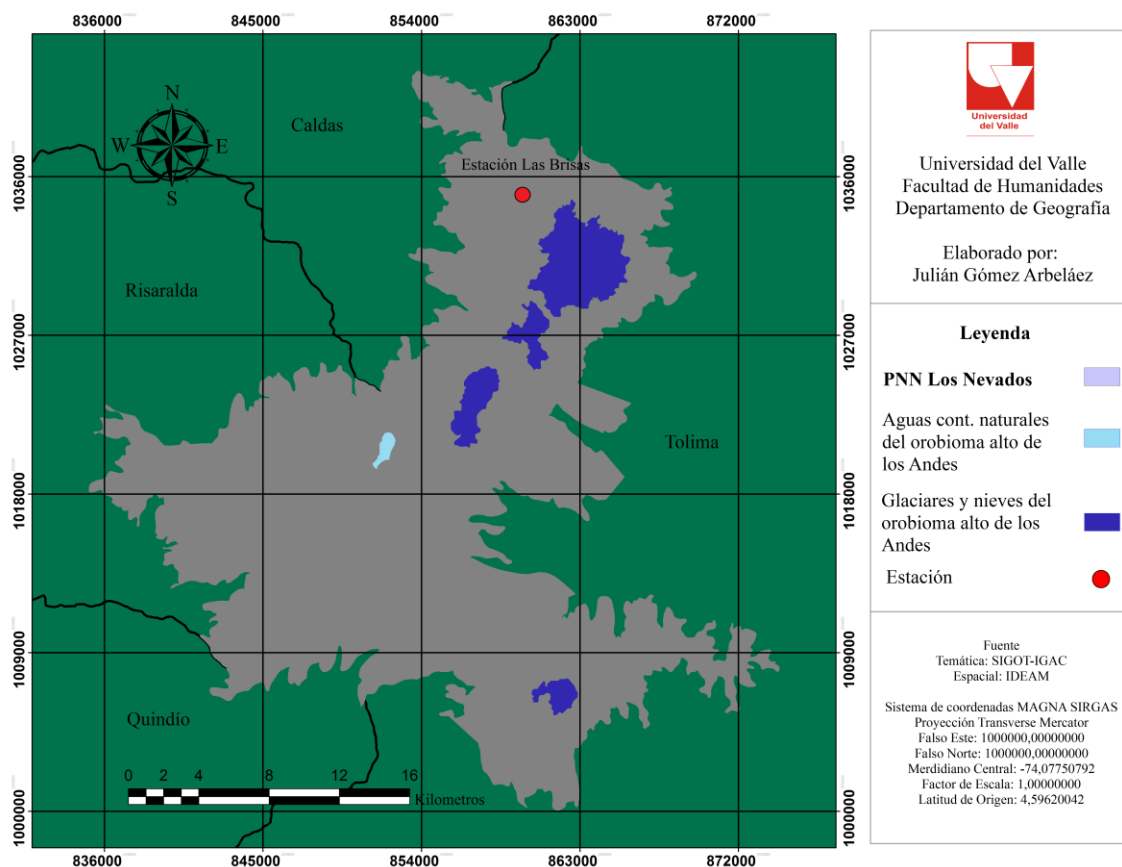
Índice	Descripción del índice	Índice	Descripción del índice
CDD	Días secos consecutivos	RX5day	Precipitación máxima en 5 días
CSDI	Duración de los períodos fríos	SDII	Índice simple de intensidad diaria
CWD	Días húmedos consecutivos	SU	Días de verano
DTR	Rango diurno de temperatura	TN10p	Noches frías
FD	Días con helada	TN90p	Noches cálidas
GSL	Estación de crecimiento	TNn	Temperatura mínima extrema
ID	Días con hielo	TNx	Temperatura mínima más alta
PRCPTOT	Precipitación total anual	TR	Noches tropicales
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	TX10p	Días frescos
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	TX90p	Días calurosos
R95p	Días muy húmedos	TXn	Temperatura máxima más baja
R99p	Días extremadamente húmedos	TXx	Temperatura máxima extrema
Rnnmm	Días con lluvia mayor a nn	WSDI	Duración de los períodos cálidos
RX1day	Precipitación máxima en 1 día		

Fuente. Vásquez Aguirre, 2010.

3.2.1.4 Capas digitales de información geográfica

Para la realización de los mapas, se utilizó como fuente temática la división administrativa departamental de Colombia disponible en el SIG-OT – Sistema de Información Geográfico para la Planeación y el Ordenamiento Territorial realizados por el IGAC. Los datos espaciales poseen sistema de referencia Magna SIRGAS, de acuerdo a la zona en que se encuentren, con proyección Transverse Mercator, en meridiano central 74,07° E y latitud de origen 4,59° N.

Mapa 3. Ubicación de la estación meteorológica Las Brisas.



Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por IDEAM (2015).

3.2.1.5 Modelo de elevación digital -MED-

Para la modelación en tres dimensiones, se usó un recorte del área de estudio del modelo de elevación digital ASTER GDEM o Modelo de Elevación Digital Mundial desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón - METI y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio – NASA. El modelo posee pixeles a 30 metros, con sistema de referencias del Sistema Geodésico mundial o *World Geographical System* de 1984 - WGS84 que se usa para las proyecciones de escala mundial como el ASTER GDEM.

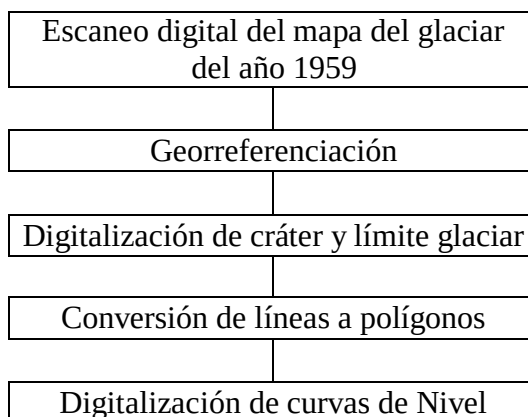
3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Determinación del área y la altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1959

Con el propósito de contar con información digital en todas las fechas, la digitalización del mapa de área glaciar del Nevado del Ruiz realizado por Wilfred Linder, para 1959, se llevó a cabo por medio de los *softwares* ArcGIS 10.2 y QGIS, los cuales poseen herramientas idóneas para generar una producción cartográfica a una escala detallada. El procedimiento seguido se observa en la Figura 10; para la georreferenciación del mapa escaneado se utilizaron 5 puntos de control determinados en coordenadas planas Magna SIRGAS, en cada vértice del mapa convencional. Posteriormente se procedió a digitalizar los aspectos de interés: cráter del volcán, límite del glaciar y curvas de nivel. Este procedimiento se realizó con el propósito de que el mapa digital pudiera ser comparado a los mapas obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes LandSat.

Para la determinación de la altura del glaciar, se utilizó la metodología planteada por Flinn en 1971, donde se toma como puntos de muestreo las cotas más bajas de lugares con hielo en el momento en que se realice la toma de los datos. En este sentido, se tomaron 4 puntos de muestreo de altura que se repetirán en orientación para cada temporalidad, serán uno para cada punto cardinal.

Figura 10. Digitalización del mapa de Wilfred Linder (1985).



Fuente. Elaboración propia (2015).

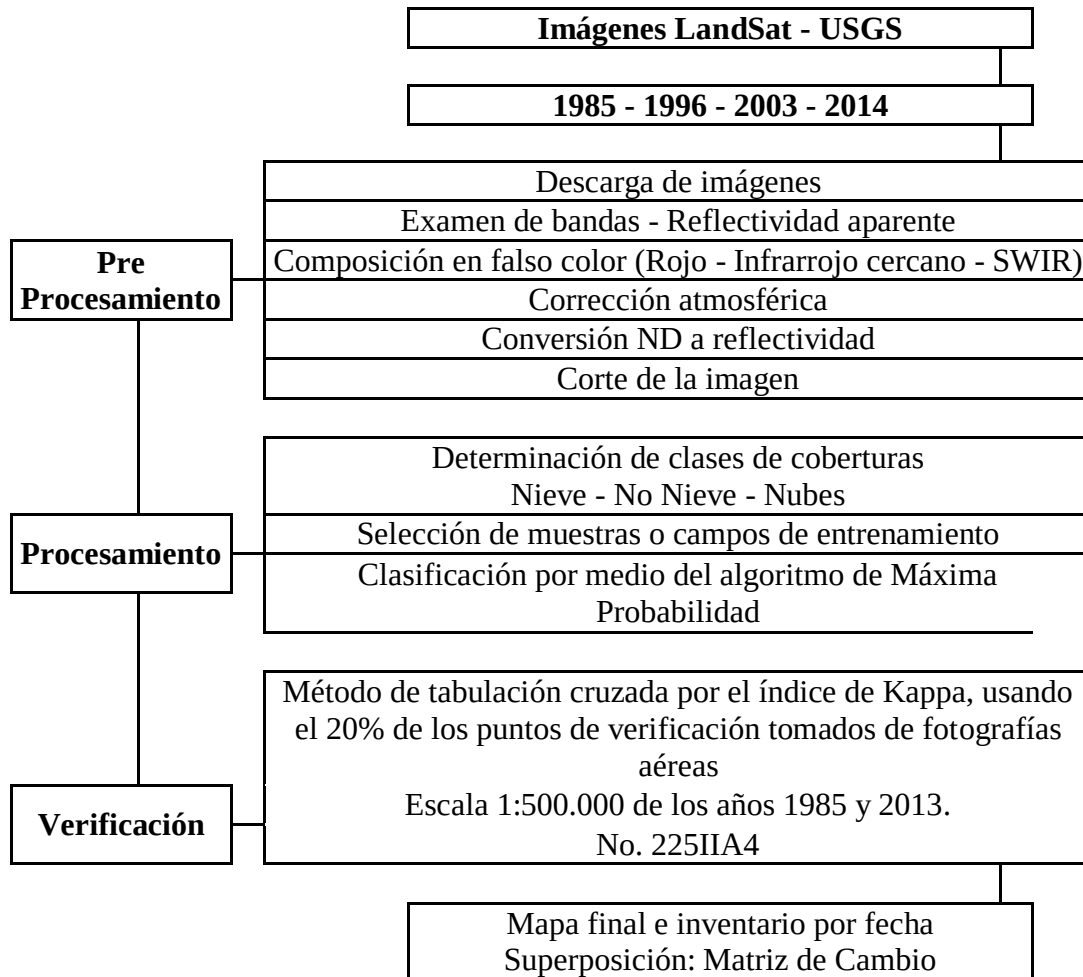
3.2.2.2 Determinación del área y la altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1985, 1996, 2003 y 2014

A las imágenes se les realizó un proceso que consta de tres etapas, las que se pueden observar en la figura 12.

A las imágenes utilizadas se le realizó inicialmente un corte de modo que cubriera el área de estudio. Posteriormente, se realizó el procesamiento digital usando el Software ArcGIS versión 10.2. El proceso de la elaboración cartográfica del estudio se realizó igualmente, con ayuda del software ArcGIS versión 10.2., usando fundamentalmente la capa de perímetro del parque y sus ecosistemas contenida en el SIG-OT perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

A las imágenes utilizadas se le realizó inicialmente un corte de modo que cubriera el área de estudio. Posteriormente, se realizó el procesamiento digital usando el Software ArcGIS versión 10.2. El proceso de la elaboración cartográfica del estudio se realizó igualmente, con ayuda del software ArcGIS versión 10.2., usando fundamentalmente la capa de perímetro del parque y sus ecosistemas contenida en el SIG-OT perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

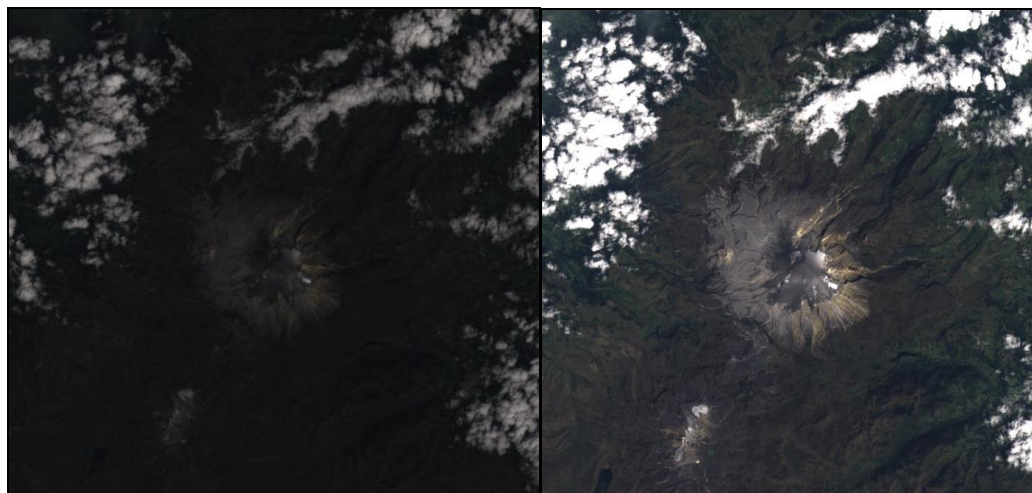
Figura 11. Proceso realizado a las imágenes satelitales.



Fuente. Elaboración propia (2015).

A las imágenes se les aplicó la función de reflectancia aparente, con el fin de lograr un mejor detalle y contraste para poder obtener de ella el mayor provecho. Fundamentalmente se busca reducir la capa de bruma que posee la atmosfera en el momento de la captura y de esta forma lograr depurar los pixeles y lograr una mejor representación de la superficie (Ver Figura 12).

Figura 12. Ejemplo de una imagen sin corrección (izq) y con corrección (der) para 2014.



Fuente. USGS (2014).

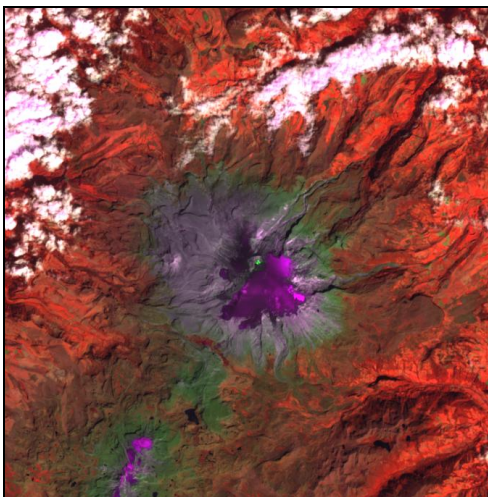
Para la determinación de la cobertura del área glacial y otras coberturas, se usó el método de clasificación supervisada el cual hace uso del algoritmo de Máxima Probabilidad, en la cual se tomaron como referencia las firmas espectrales de las diferentes coberturas presentes en la superficie del área de estudio. Ésta clasificación supervisada requiere de un conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas presentes en el área de estudio, para lo que se debe hacer una combinación de trabajo de campo que en este caso fue con el uso de fotografías aéreas, además de mapas e informes técnicos, así como referencias profesionales y locales que tengan conocimiento del tema.

Con base en este conocimiento se definieron y delimitaron sobre la imagen los **campos de entrenamiento** o *training fields* (TF). Las características espectrales de éstas áreas fueron utilizadas a fin de construir el algoritmo de clasificación de Máxima Probabilidad mencionado anteriormente, el cual calcula los parámetros estadísticos de probabilidad de cada banda para cada lugar de toma de muestra o TF y de esta forma proceder a evaluar cada ND de los píxeles presentes en la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase (Ver Figura 14).

El proceso inicia con la creación de la imagen RGB ya corregida en la combinación de 5 – 7 – 4, que determina el infrarrojo cercano en el primer canal, el infrarrojo de onda corta 2 o

SWIR 2 en el segundo canal y por último el rojo en el tercer canal. Esto se realiza con el fin de realzar lo mejor que se pueda la nieve del resto de las coberturas y lograr una clara diferenciación entre ellas, como se explicó anteriormente (Ver Figura 13).

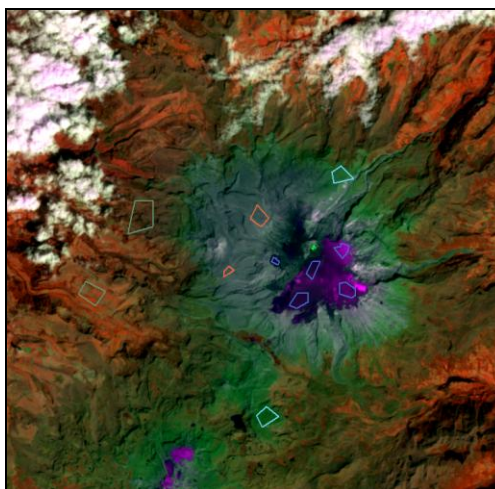
Figura 13. Ejemplo de una imagen en composición RGB 5 – 7 – 4 para el año 2014.



Fuente. Imagen proporcionada por USGS (2014), modificada por el autor (2015).

Ya con la imagen en la combinación RGB deseada, se procede a realizar la clasificación supervisada. Como primer paso se selecciona la extensión *Image Classification* en el software ArcGIS la cual despliega las opciones para empezar el proceso de clasificación. Como primera premisa, se debe tener en cuenta que según Chuvieco (2008), el número mínimo de píxeles de muestra para determinar una clase de cobertura está determinada por el número de bandas que se están usando más uno, es decir en éste caso es tres bandas + uno = cuatro como número mínimo de píxeles de muestra o entrenamiento.

Figura 14. Imagen en composición RGB 5 – 7 – 4 con los polígonos de entrenamiento para el año 2014.



Fuente. Imagen proporcionada por la USGS (2014) y modificada por el autor (2015).

Las clases de cobertura utilizadas para realizar la clasificación fueron trece clases, las que posteriormente se fusionaron en tres; nieve, no nieve y nubes. Se tomaron, dentro de cada clase, varias subclases (Ver tabla 12) con el propósito de tener una firma espectral más y mejor definida, al final se fusionaron las subclases de cada clase general.

Dicha catalogación se realizó de tal forma que se lograra generar el menor error posible a la hora de aplicar el algoritmo, pues al tener poca cantidad de clases los umbrales de firmas espectrales son menos claros y el algoritmo debe determinar las clases con menores posibilidades en los valores de cada pixel.

Tabla 12. Datos sobre las muestras usadas para la clasificación de las imágenes.

Clase	Clase observada	Subclases	Ecosistema	Número de Polígonos	Número de píxeles
1	Nieves	Nieve joven, FIRN y Hielo	Glaciares del Ruiz	10	50
2	No nieve	Páramo 1 y 2, Bosques 1 y 2, Rastrojos 1 y 2, arbustales 1 y suelo desnudo 1 y 2.	Páramo, Superpáramo y Bosque Alto Andino	10	50
3	Nubes	Nubes	Nubes	10	50

Fuente. Elaboración propia (2015).

Al proceso de la toma de muestras para la clasificación que se realiza por medio de los campos de entrenamiento, se le debe realizar un control a cada uno de los grupos de píxeles de muestra escogidos. Dicho control se realizó acudiendo al índice de Kappa (Viera y Garrett, 2005), el cual utiliza una matriz de confusión en la que se compara el 20% las muestras por polígonos que se han generado por el investigador y el 20% de las muestras igualmente por polígonos a las que el algoritmo les ha dado una clase determinada.

3.2.2.3 Metodología de análisis de datos de temperatura para los periodos 1959 - 1985 y 1985 y 2014

Como paso inicial para la comparación de la temperatura de los dos periodos de tiempo se procedió a realizar gráficos y tablas en las cuales se hace un paralelo entre los promedios mensuales, en grados centígrados desde, 1959 a 1985 y de 1985 a 2014. No obstante, se profundizó mucho más en la caracterización del periodo 1985 a 2014, ya que se contaba con valores diarios de mínimas y máximas, lo que permitió realizar gráficos de tendencias, con las cuales se pudo describir la variabilidad de la temperatura para todo el periodo y establecer su relación con el comportamiento del glaciar.

Por último, se realizó la comparación entre los datos arrojados para los dos periodos, y se logró determinar la magnitud de los cambios en la temperatura y la relación de la variabilidad de la misma con respecto a la dinámica glaciar. Vale recordar que para esta investigación solo se usó la estación Las Brisas porque las demás dispuestas por el IDEAM en la red hidrometeorológica, no poseen la altitud necesaria para poder ser utilizadas, ni tampoco la recurrencia de datos que fueran útiles para la descripción del comportamiento de la temperatura en esta zona del Parque.

- **Temperatura mínima absoluta:** Es la temperatura más baja obtenida en el registro dentro de un periodo de tiempo determinado.
- **Temperatura mínima media:** Es la temperatura obtenida mediante el promedio de las temperaturas mínimas dentro de un periodo de tiempo determinado.

- **Temperatura promedio:** Es la temperatura total promediada en un lapso de tiempo determinado.
- **Temperatura máxima media:** Es la temperatura obtenida mediante el promedio de las temperaturas máximas dentro de un periodo de tiempo determinado.
- **Temperatura máxima absoluta:** Es la temperatura más alta obtenida en el registro dentro de un periodo de tiempo determinado.

La determinación de los índices de cambio climático extremo del ETCCDI extraídos mediante el *software* de RClimdex usados en la presente investigación, el programa utiliza las series de datos de temperatura máxima y mínima promedio diaria para lograr extraer los siguientes índices:

- **TNn. Temperaturas mínimas extremas:** Sea Tn_{kj} la temperatura mínima en el mes k y periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces:
 - $TNn(kj) = \min(TN_{kj})$
- **TXn. Temperatura máxima más baja:** Sea TX_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:
 - $TXn(kj) = \min(TX_{kj})$
- **Tx90p. Frecuencia de días calurosos:** Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx en 90 en días calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:
 - $Tx_{ij} > Tx \text{ en } 90$

- **Tx10p. Frecuencia de días frescos:** Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx en 10 en días calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje del tiempo en el que:

$$○ Tx_{ij} < Tx \text{ en } 10$$

- **DTR. Rango diurno de temperatura:** Sean TX_{ij} y TN_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

Para la estimación de umbrales y el cálculo del periodo base para los índices de temperatura se realiza una estimación empírica del cuantil, el cual corresponde a los puntos tomados a intervalos regulares de la función de distribución de una variable aleatoria. Esto quiere decir que la totalidad de los datos se dividen ya sea en cuartiles, quintiles, deciles y percentiles, que obedecen a su vez a 0.25%, 0.20%, 0.10% y 0.01% respectivamente.

El cuantil de una distribución se define entonces como:

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \inf\{x : F(x) \geq p\}, 1 < p < 1$$

Donde $F(x)$ es la función de distribución. Sea $\{X_{(a)}, \dots, X_{(n)}\}$ la estadística de orden de $\{X_1, \dots, X_n\}$ (i.e. valores ordenados de $\{X\}$), y sea $\hat{Q}_i(p)$ la definición del cuantil i th. Los cuantiles muestrales pueden ser generalmente escritos como:

$$\hat{Q}_i(p) = (1 - \gamma)X_{(j)} + \gamma X_{(j+1)}$$

Hyndman y Fan (1996) sugieren una fórmula para obtener estimados medios un-biased del cuantil haciendo $j = \text{int}(p * n + (1 + p) / 3)$ y haciendo $\gamma = p * n + (1 + p) / 3 - j$, donde $\text{int}(u)$ es el entero más grande que no sea mayor que u . El cuantil empírico es igual al valor en la muestra más grande o al más pequeño cuando $j < 1$ o $j > n$ respectivamente. Esto es, estimados de cuantiles correspondientes a $p < 1/(n+1)$ son fijados al valor más pequeño de la

muestra, y aquellos correspondientes a $p > n/(n+1)$ son igualados al valor más grande de la muestra.

Lo anterior fue tomado del Manual del Usuario de RClindex, de la autoría de Zhang y Yang (2004) y traducido por Juan Santos del Centro Internacional para la Investigación sobre el Fenomeno de El Niño - CIIFEN.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del trabajo se dividen en el análisis del año 1959, luego la clasificación de las imágenes y la delimitación del área y extracción de la altura del glaciar para 1985 y 2014 y por último, el análisis detallado de la temperatura en la estación Las Brisas.

4.1 Estado del Glaciar del Volcán Nevado del Ruiz para el año 1959

Este primer apartado, explica el área del glaciar del Ruiz como resultado de la utilización del estudio de los mapas antiguos recopilados para esta investigación.

- Área y altura del glaciar del Ruiz para 1959

Según la interpretación del mapa realizado por Wilfred Linder (Ver Mapa 4), el área del glaciar para el año 1959 era de 2060 ha, lo que da cuenta de una extensión muy grande de la masa helada. Ésta medición, se realizó por medio de la determinación del límite del glaciar y su posterior medición de superficie en un modelo altitudinal.

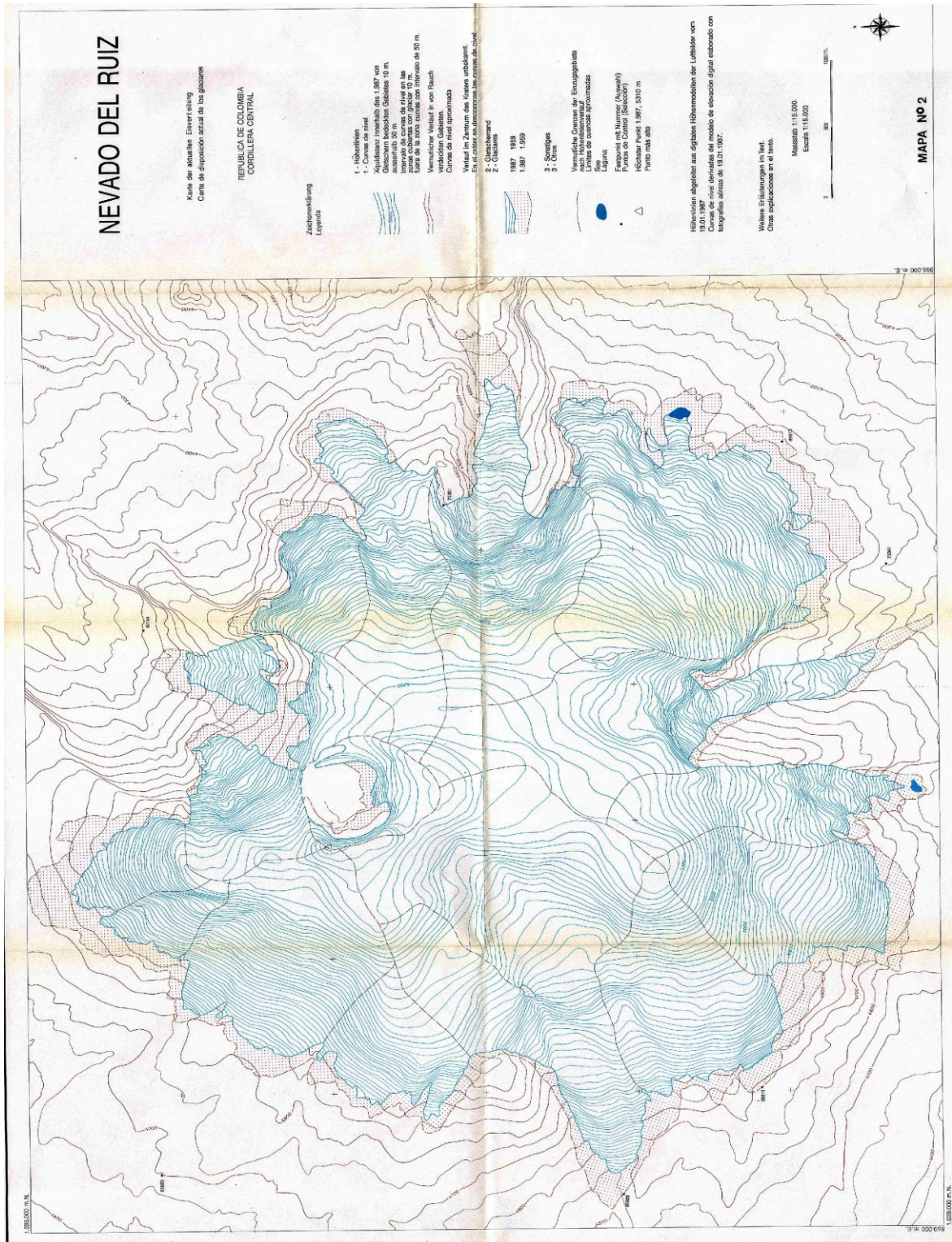
Según la metodología planteada por Flinnt (1971), la altura promedio del casquete para este año fue de 4260 msnm, teniendo como punto más bajo de alcance de las nieves los 4131 msnm hacia la cota W y como punto más alto, los 4464 msnm hacia el Sur (Ver tabla 13).

Tabla 13. Cotas de altura del glaciar para el año 1959.

Altura Máxima	Año 1959 (msnm)
Cota 1 (N)	4119
Cota 2 (S)	4464
Cota 3 (W)	4131
Cota 4 (O)	4326
Promedio	4260

Fuente. Elaboración propia (2015).

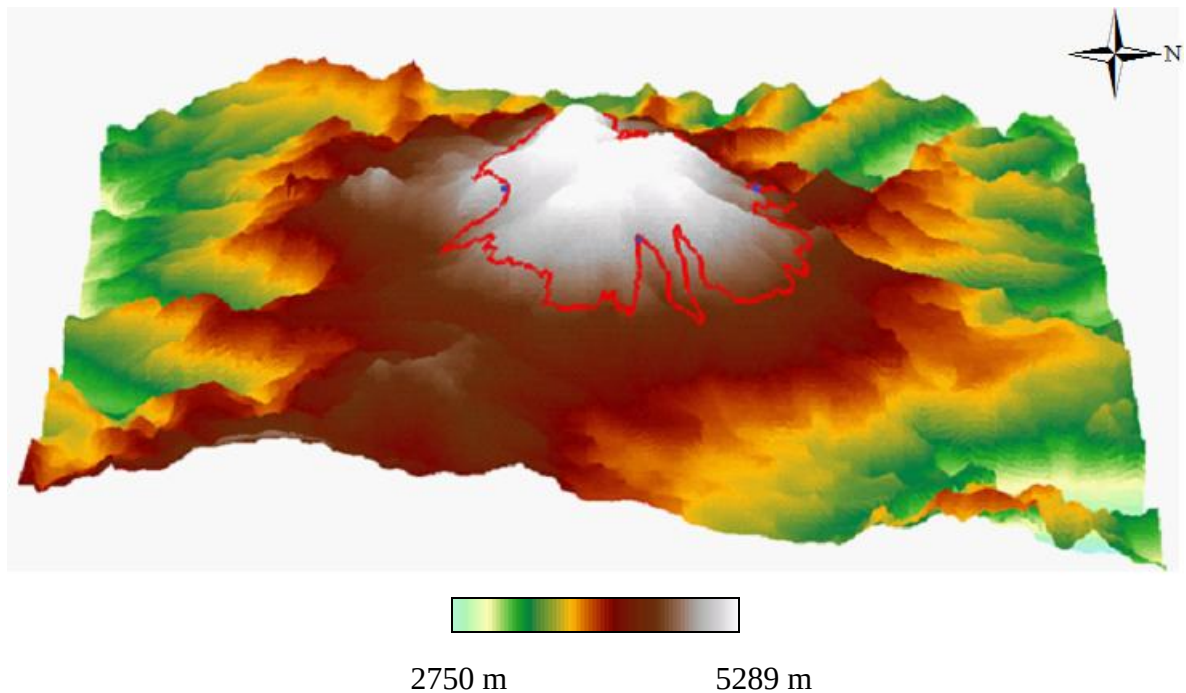
Mapa 4. Mapa del glaciar del Ruiz para el año 1959 por Wilfred Linder.



Fuente: Tomado de Linder, 1987.

En la figura 15, se muestra una representación del glaciar del Ruiz para el año 1959 sobre el Modelo de Elevación Digital Mundial y se observan las cotas (puntos azules) de altura máxima hacia el sur, occidente y norte.

Figura 15. Modelo 3D de cobertura glaciar de Wilfred Linder, obtenido a partir de curvas de nivel para el año 1959.



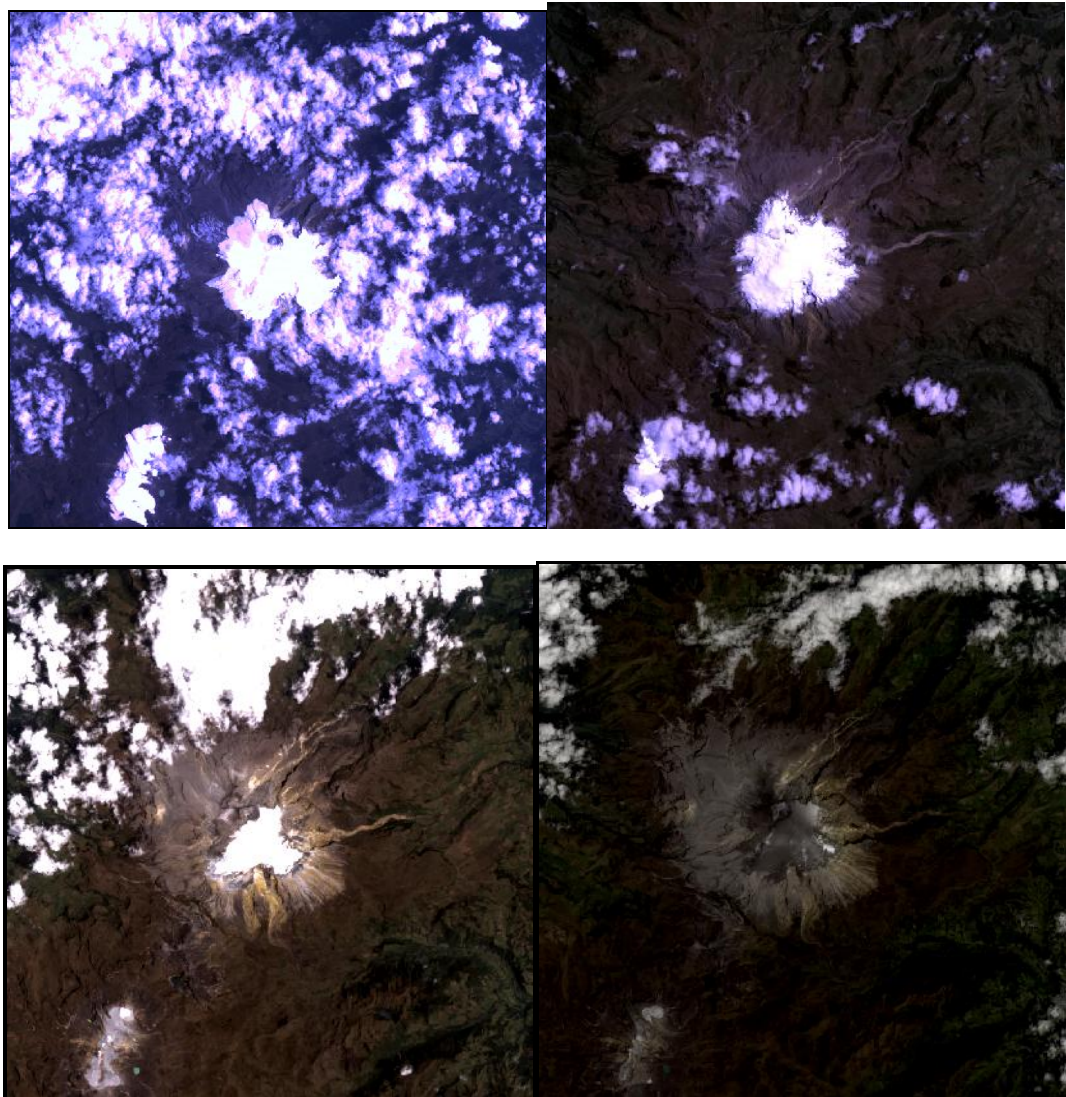
Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por Linder (1993).

4.3 Resultados clasificación de las coberturas para los años 1985, 1993, 2003 y 2014

Para estas fechas se utilizaron las mismas técnicas de medición de áreas y alturas del glaciar que en el punto anterior, pero aplicadas a las cuatro imágenes satelitales de las plataformas LandSat 5, 7 y 8 OLI mostradas en la Figura 16. La ventaja de poseer herramientas satelitales, es que se pudieron realizar distintas combinaciones que permitieron resaltar las distintas cubiertas; en este caso se usó la combinación SWIR - Infrarojo cercano - Rojo, la cual que resaltaba de mejor manera la nieve del resto de

coberturas. Lo anterior se debe a que la reflectancia de esta cobertura posee características únicas que la hacen una superficie que refleja la luz del sol casi en su totalidad como se explicó con anterioridad. También, la modelación 3D ayuda a que se presente menor error en la toma de las medidas de altura.

Figura 16. Imágenes del área de estudio para Marzo de 1985 (izq. arriba), Agosto de 1996 (der. arriba), Julio de 2003 (izq. Abajo) y Diciembre de 2014 (der. abajo).



Fuente. (USGS, 2014).

4.2.1 Área y altura del glaciar del Ruiz para 1985

Al igual que en el caso anterior, se trazó el límite del glaciar tanto inferior como superior (en el cráter), se sobre puso sobre el modelo altitudinal para determinar el área. Para el 13 de marzo de 1985 el área del glaciar era de 1686 has (Ver figura 17).

Figura 17. Área del casquete glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1985.



Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por USGS (1985).

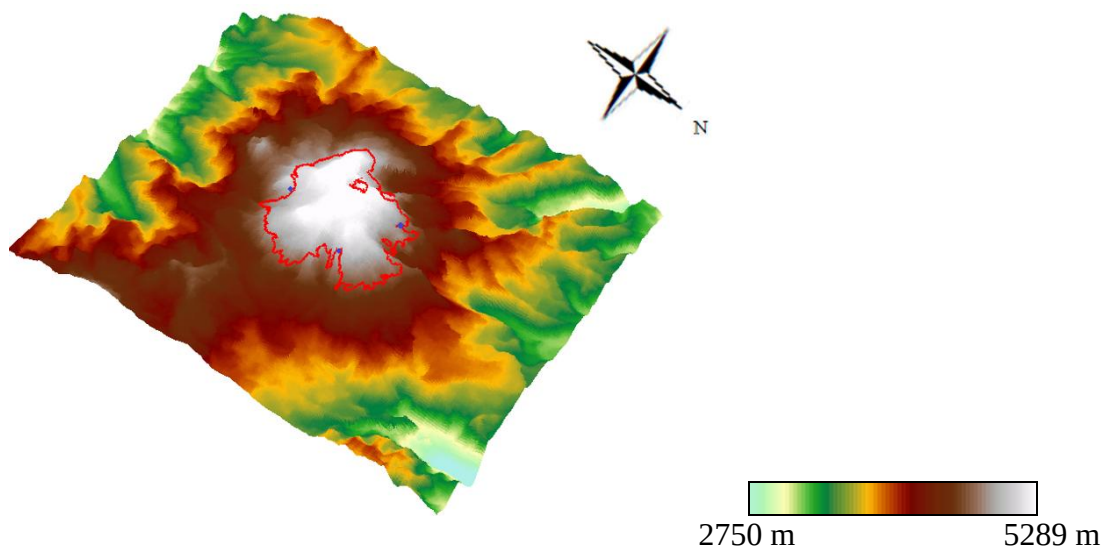
La altitud del glaciar, en promedio fue de 4378 metros (Ver Tabla 14), la parte más baja del glaciar se ubicó a 4238 msnm. en la cota Norte del glaciar; en cambio la más alta se localizó a 4624 msnm de altitud en la cota Sur (Ver Figura 18). Esta altura se tomó según la metodología de Flinnt (1971), mencionada con anterioridad.

Tabla 14. Cotas de altura del glaciar para el año 1985.

Altura Máxima	Año 1985 (msnm)
Cota 1 (N)	4238
Cota 2 (S)	4624
Cota 3 (W)	4300
Cota 4 (O)	4350
Promedio	4378

Fuente: Elaboración propia (2015).

Figura 18. Puntos de muestreo para la altura del casquete para el año 1985.

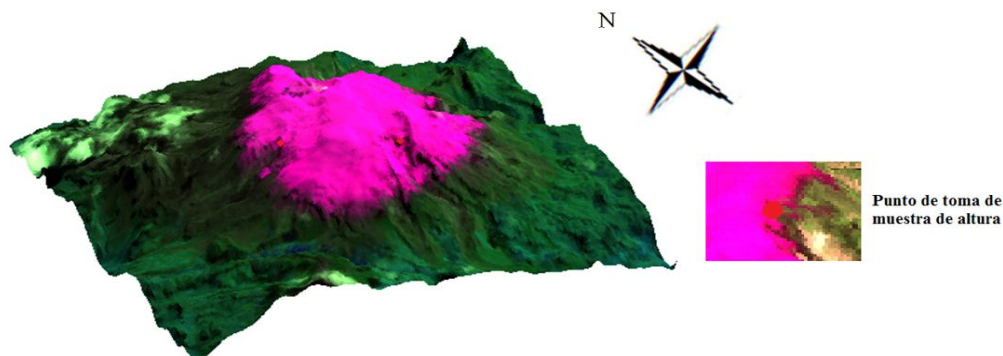


Fuente: Elaboración propia (2015).

4.2.2 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1996

Los resultados de la clasificación de la imagen LandSat 5 de Agosto de 2016, arroja una cifra de 1326 ha en total para el área del glaciar. En la figura 19 se muestra la composición en falso color (4 - 7 - 3) de la zona de estudio; y en la Figura 20 la clasificación obtenida.

Figura 19. Área del casquete glaciar del Nevado del Ruiz para el año 1996.



Fuente: Elaboración propia (2016).

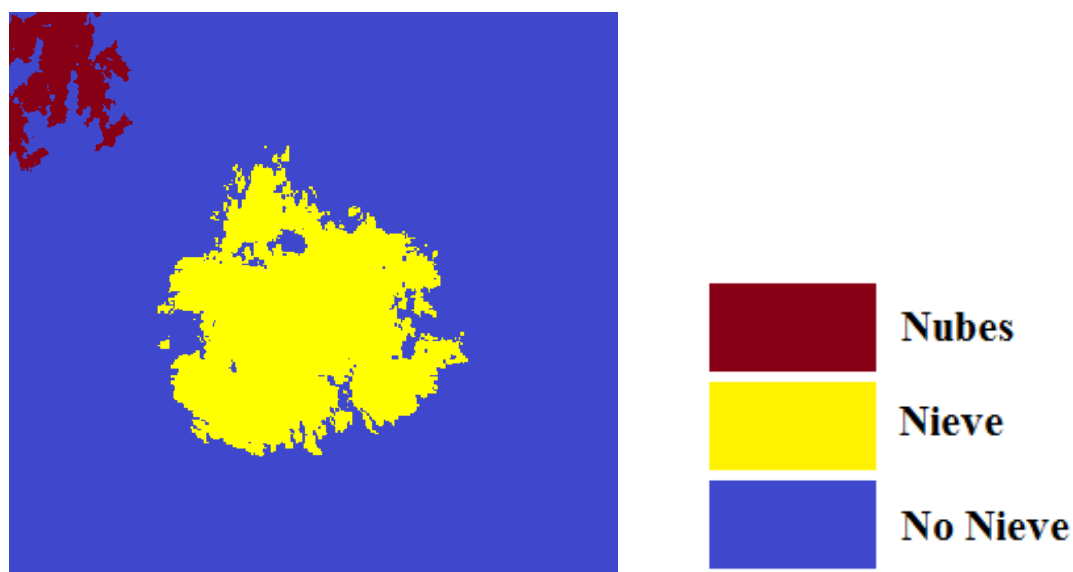
La tabla 15, incluye las cifras obtenidas en la medición de las cotas máximas de altura para el perímetro glaciar del año 1996. En ella se aprecia que el punto más bajo del glaciar esta hacia los 4368 msnm y la más alta supera los 4590 msnm.

Tabla 15. Cotas de altura del glaciar para el año 1996.

Altura Máxima	Año 1996 (msnm)
Cota 1 (N)	4368
Cota 2 (S)	4724
Cota 3 (W)	4490
Cota 4 (O)	4595
Promedio	4544

Fuente: Elaboración propia (2015).

Figura 20. Área del casquete glaciar del Nevado del Ruíz para el año 1996.

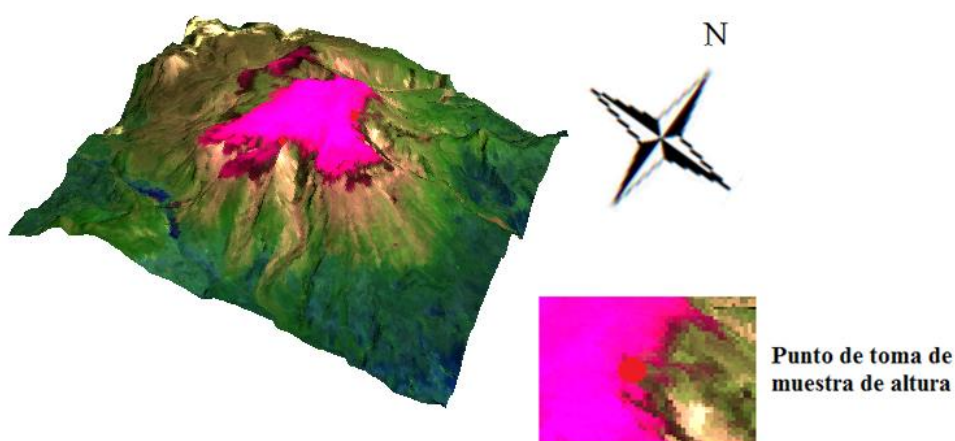


Fuente: Elaboración propia (2015).

4.2.3 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2003

Para este año el glaciar poseía 759 ha, como se muestra en la figura 21. La clasificación obtenida para este año se muestra en la Figura 22, esta imagen posee una particularidad pues en el área focalizada del nevado no poseía para la hora de la captura, no poseía nubosidad cercana.

Figura 21. Área del casquete glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2003.



Fuente: Elaboración propia (2015).

Figura 22. Área del casquete glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2003.



Fuente: Elaboración propia (2015).

Para las cotas de altura máxima del año 2003, el glaciar poseía para el punto más bajo de su perímetro glaciar hacia los 4434 msnm en la cota Norte y la máxima hacia casi los 4968 msnm. Las cifras totales se pueden observar en La tabla 16.

Tabla 16. Cotas de altura del glaciar para el año 2003.

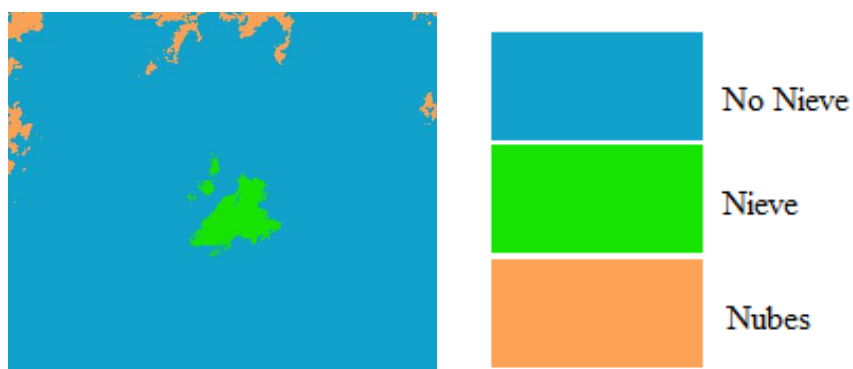
Altura Máxima	Año 2003 (msnm)
Cota 1 (N)	4432
Cota 2 (S)	4968
Cota 3 (W)	4665
Cota 4 (O)	4668
Promedio	4638

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.2.4 Área y altura del glaciar del Nevado del Ruíz para el año 2014

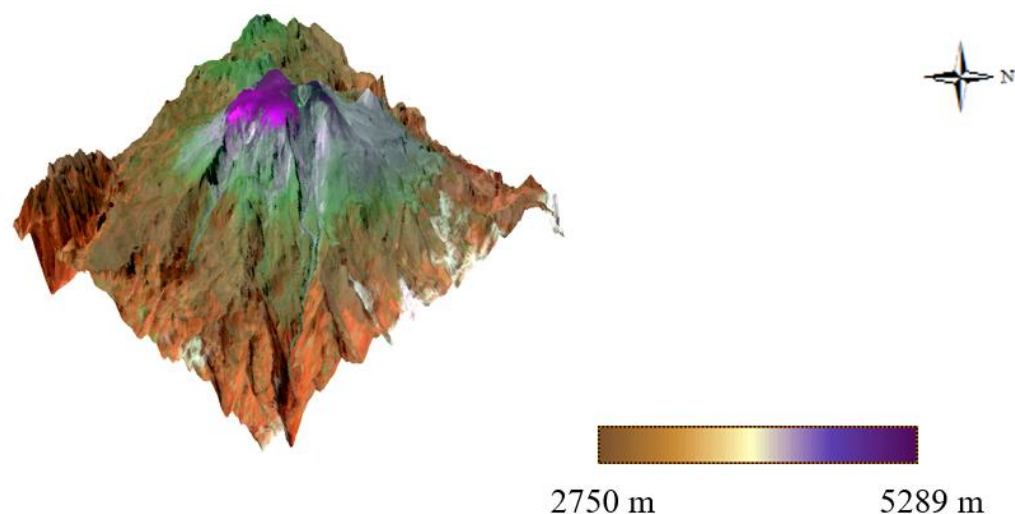
Los resultados de la clasificación de la imagen LandSat 8 de diciembre de 2014, arrojan una disminución del glaciar al llegar a cubrir 617 ha de extensión. En la figura 24 se muestra la composición en falso color (5 - 7 - 4) de la zona de estudio; en la Figura 23 la clasificación obtenida.

Figura 23. Área del casquete para el año 2014.



Fuente. Elaboración propia (2015).

Figura 24. Imagen en falso color del glaciar del Nevado del Ruiz para el año 2014, sobre un modelo 3D.



Fuente. Elaboración propia (2014).

Respecto a la altura de la cota glaciar (Ver Tabla 17), se demuestra un ascenso del nivel promedio de la línea de nieves hasta tener un promedio de 4719 msnm, teniendo su punto más bajo hacia los 4600 msnn en la cota Norte.

Tabla 17. Cotas de altura del glaciar para el año 2014.

Altura Máxima	Año 2014 (msnm)
Cota 1 (N)	4600
Cota 2 (S)	4774
Cota 3 (W)	4649
Cota 4 (O)	4856
Promedio	4719

Fuente. Elaboración propia (2015).

4.3 Comportamiento de la temperatura para los periodos 1959–1985 y 1985–2014

Como se ha dicho anteriormente, el análisis de estos datos climáticos se usa como un método descriptivo del comportamiento medio de la temperatura comparado con los datos propios del glaciar, para realizar un paralelo entre los valores que arrojaron los dos procesos.

En el primer periodo se tienen datos promedios mensuales multianuales de temperatura en la estación Las Brisas, que evidencian un patrón bimodal, con mayor variación para el periodo 1959 - 1985 (Ver gráfico 3), pero determinando a 1985 - 2014 como el más caluroso pues así su variación no sea mayor, los valores son mucho más altos. En el primer periodo se tiene que los meses más calurosos son Mayo y Marzo con 4,6°C y el más frío, Septiembre con 3,5°C. La temperatura a lo largo del año no superó los 1,1°C de variación entre los meses más fríos y más calurosos de la serie. Para el segundo periodo, se tiene que Enero es el mes más frío con 4,4°C y Mayo el más caluroso con 5,2°C, teniendo apenas 0,8°C de variación entre los valores más bajos y más altos de la serie. Adicionalmente, la tendencia de la temperatura muestra que la serie de 1959 - 1985 es a la baja y en 1985 - 2004 es al alza, lo que también sugiere que el patrón climático en la zona está cambiando pues los meses que antes eran muy fríos han cambiado sus valores radicalmente.

En este sentido, para el primer periodo se tiene un aumento de 0,6°C para la zona del glaciar entre los dos periodos estudiados, este cambio responde a diferentes procesos climáticos como el Shift del Pacífico ya mencionado, en el cual aumentó la frecuencia de eventos cálidos del fenómeno de El Niño, el cual produce que los meses sean cada vez más cálidos con respecto su promedio cuando no se está en esta fase climática (Ver tabla 18). Además, se evidencia cómo los meses de Junio y Julio son los que mayor aumento tienen como respuesta al incremento de las máximas temperaturas a lo largo del año, lo que da cuenta de que cada vez los meses naturalmente más calientes, tienden a volverse aún más cálidos con el pasar del tiempo (Ver Gráfico 3). Para el segundo periodo, se poseen valores medios, medios mínimos y máximos, y máximos y mínimos absolutos por lo que se realizó un mejor análisis. En principio se contó con la temperatura máxima, media y mínima por

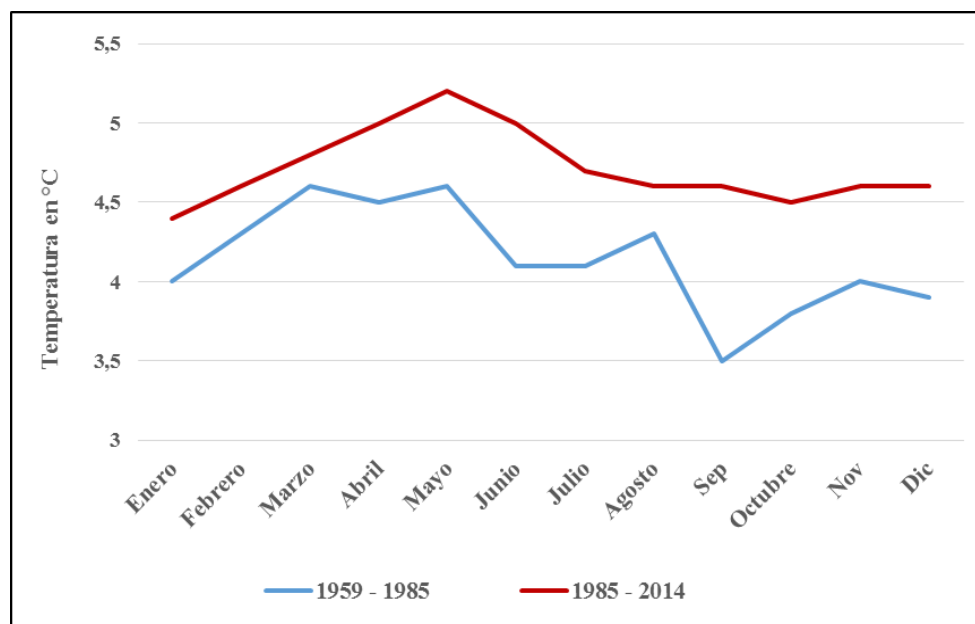
mes para toda la serie de años del estudio, exceptuando algunos años en los que no se obtuvo información. En este sentido se realizaron gráficos en los cuales se demuestra el comportamiento de la temperatura mínima, media y máxima respectivamente.

Tabla 18. Promedios multianuales totales de temperaturas para los periodos 1959 a 1985 y 1985 a 2014.

Periodo	Estación	Variable (°C)	Prom
1959 - 1985	Las Brisas	Temp	4,1
1985 - 2014			4,7
		Diferencia	0,6

Fuente. Elaboracion propia con datos proporcionados por Linder (1993) e IDEAM (2015).

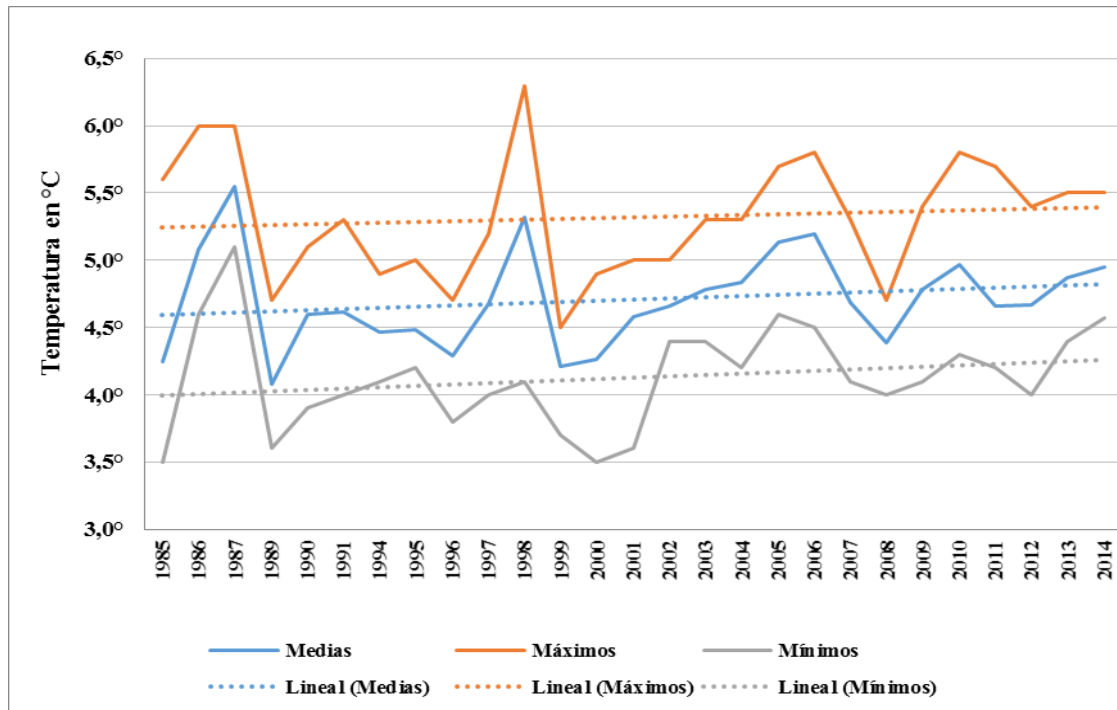
Gráfico 3. Promedios mensuales de temperaturas para los periodos 1959 a 1985 y 1985 a 2014.



Fuente: Elaboración propia (2015).

La variación de la temperatura mínima, media y máxima para el periodo de tiempo 1985 a 2014 ha tenido un comportamiento de a temperatura similar entre las tres variables (Max, Min y Med) (Ver gráfico 4), cuando hay un periodo de incremento se evidencia en las tres de igual manera, lo que puede indicar que a lo largo del tiempo se genera una afectación sobre los ecosistemas de la que zona deben soportar mayor tiempo con temperaturas anómalas. Lo que más se resalta de este gráfico es cómo existe un dramático ascenso de la temperatura máxima y media para el año 1998, siendo evidencia clara de la confirmación de este año como el más caluroso del que se tiene registro hasta la actualidad según la NOAA (Hansen et al, 2006); también se presentó un episodio de El Niño que recrudeció esta condición. Las temperaturas mínimas fluctuaron desde los 3,5°C en los años 1985 y 2000 hasta los 5,1°C en el 1987; las medias desde 3,6°C en el año 1989 hasta los 5,7 en 1987 y por último, las temperaturas máximas que registraron un incremento de 1,8°C consolidando al año 1998 como el año con las temperaturas más altas de la serie.

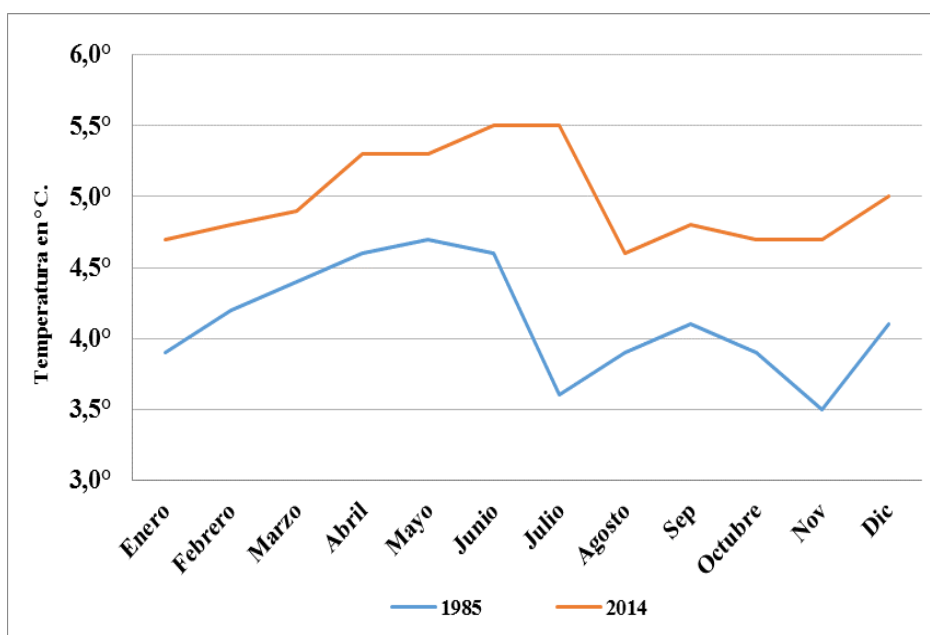
Gráfico 4. Promedios anuales de temperaturas para los años 1985 a 2014.



Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por IDEAM (2015).

Lo anterior muestra la gran variabilidad que ha tenido la temperatura a lo largo de los últimos 29 años, en comparación con décadas anteriores, la cual ha sido mucho más visible, pues dentro de esta serie de datos se tiene por ejemplo, los años más calurosos desde el inicio del monitoreo con el aumento de la frecuencia de la aparición del Niño, la mayor cantidad de huracanes en el Atlántico y el Pacífico, el mayor registro de sequías entre otros eventos que son desencadenados por el incremento de la temperatura a nivel global. Para el año 1985 se tuvo un promedio mensual de 4,1°C y para 2014 de 5,0°C con una diferencia entre los dos años de casi 1°C, que aparece en el gráfico 5 donde se demuestra un incremento bastante marcado entre los dos periodos de tiempo. Todos los meses han tenido un incremento en su temperatura que va desde los 0,5°C en el mes de Marzo y hasta los 1,9°C para el mes de Julio.

Gráfico 5. Grafico comparativo de promedios mensuales de temperaturas para los años 1985 y 2014.

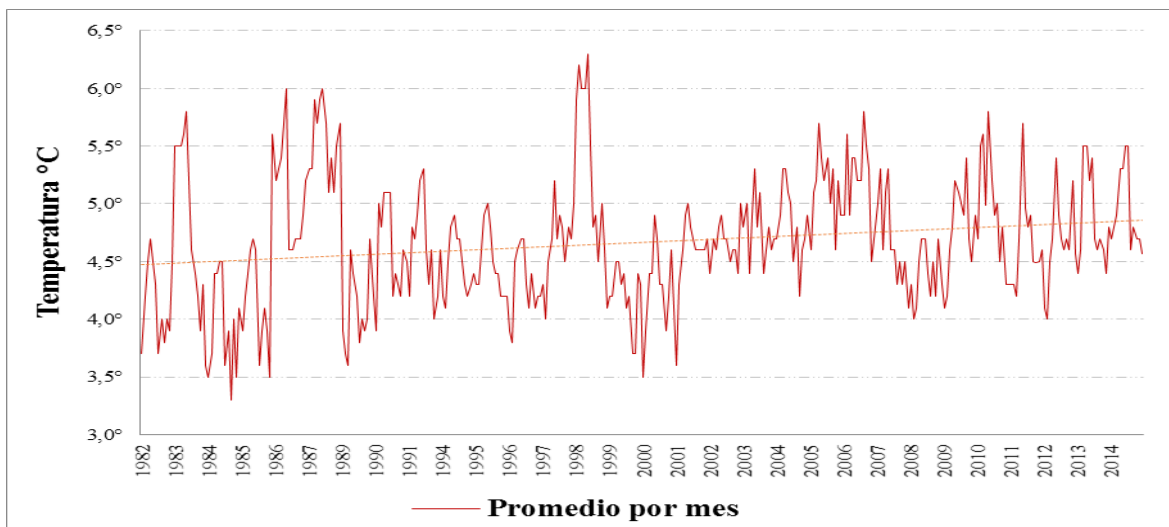


Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por IDEAM (2015).

Estos datos reflejan que los tiempos de verano son cada vez más fuertes, elevándose la temperatura considerablemente y recrudeciendo la temporada de verano en esta zona del parque natural. Es de resaltar que entre las dos series de datos se observa que el mes de julio tiene una temperatura muy baja para 1985 en contraste con 2014, donde es la más alta respondiendo así a la temporada de verano; al igual que para el mes de agosto en el año 2014 que posee también una temperatura que si bien está dentro del promedio anual, tiene una súbita caída desde el mes antecesor de casi 2°C, lo que llama la atención pues no obedece al patrón de verano-invierno que se tiene en el trópico.

El Gráfico 6 evidencia las temperaturas promedio mensuales entre los años 1985 y 2014, siguiendo con la tendencia de determinar al año 1998 como el más cálido en la serie de datos. Igualmente, por la línea de tendencia ascendente se puede concluir que la temperatura mes a mes, se incrementa y se hace menos variable, consolidándose en un intervalo de temperatura más reducida en °C pero más cálida en comparación son los primero años de esta segunda parte de la investigación.

Gráfico 6. Promedios mensuales de temperaturas medias para el periodo entre 1985 a 2014.

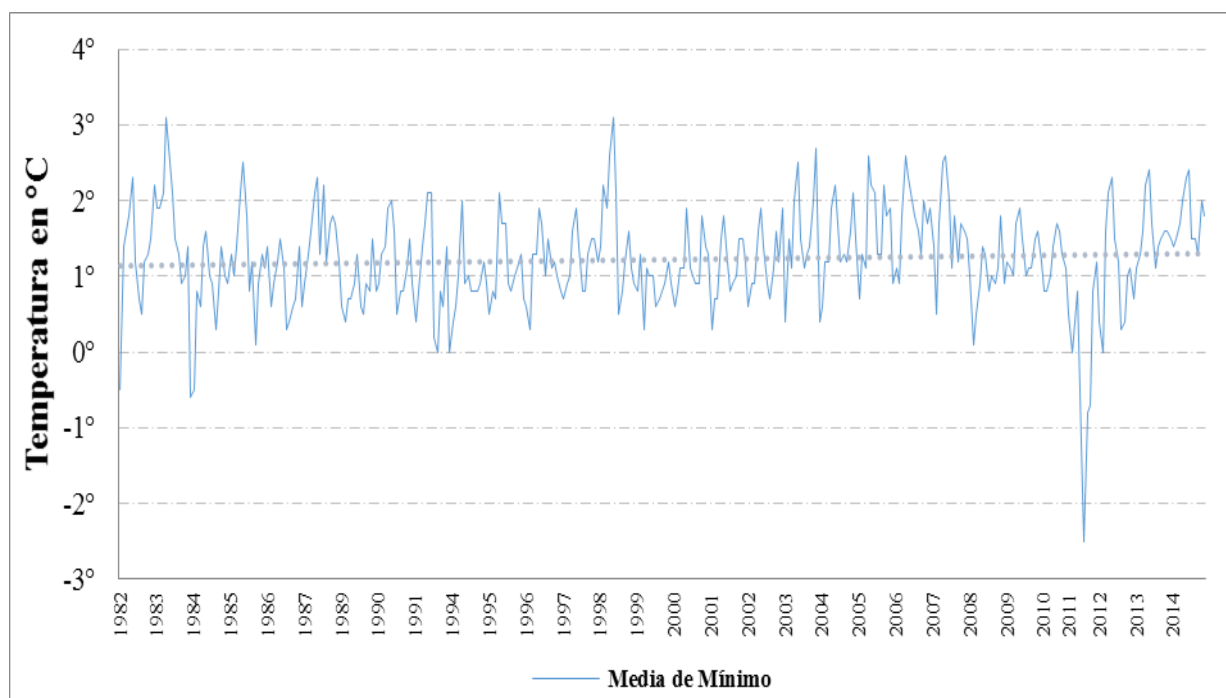


Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por IDEAM de la estación Las Brisas (2015).

Se evidencia también que en los años de Niño más fuertes (1982-83; 1992-93; 1998; 2008) la variación de los promedios mensuales, en cada año, es de menos amplitud.

En el grafico 7 se observa al igual que en los diagramas anteriores, que los promedios mensuales de temperatura mínima también tienen una tendencia ascendente en el tiempo, donde el promedio se ha incrementado en aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$, iniciando en el año 1982 con $1,3^{\circ}\text{C}$ y finalizando en el año 2014 con $1,8^{\circ}\text{C}$, con promedio total de la temporalidad de $1,2^{\circ}\text{C}$. En esta serie de tiempo se han presentado eventos anómalos como el incremento de este promedio hasta poco más de los 3°C en los años 1983 y 1998, y de descenso hacia el año 2012 con un total de $3,5^{\circ}$ por debajo del promedio llegando hasta los $-2,5^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento, dispone al glaciar a unas condiciones donde son menores los periodos de enfriamiento pues la temperatura mínima cada vez es mayor, lo que significa un ascenso en la isoterma 0° .

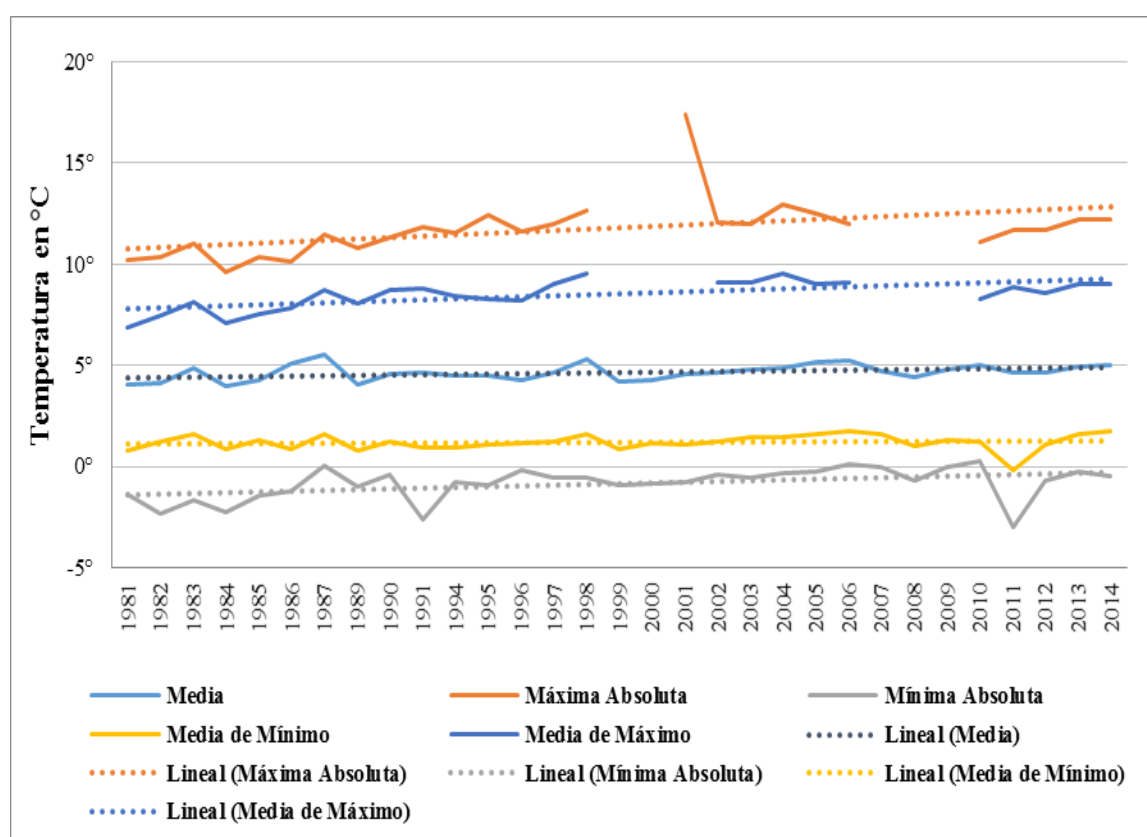
Gráfico 7. Promedios mensuales de temperaturas mínimas para el periodo entre 1985 a 2014.



Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

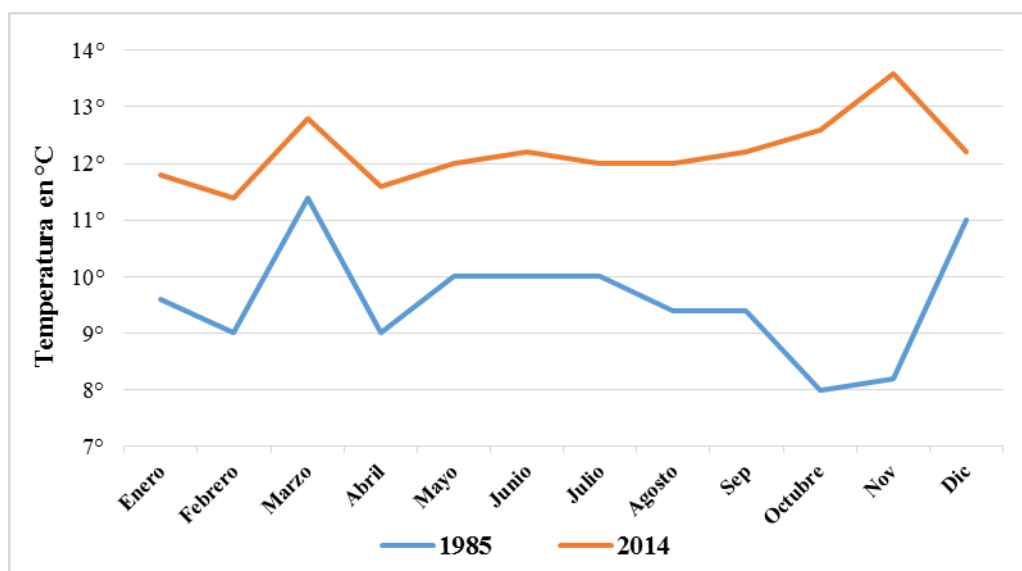
El Grafico 8, demuestra la variabilidad que ha tenido la temperatura a lo largo del segundo periodo del estudio; cabe resaltar que para la temperatura máxima absoluta y media máxima, no se contó con datos disponibles entre los años 1998-2002, y 2006-2010. Como lo evidencian las líneas de tendencia, la variabilidad de la temperatura se ha visto marcada con un claro incremento, sobre todo la media la cual inició en 4 °C para 1981 y finalizó en 5 °C para el año 2014.

Gráfico 8. Promedios anuales de temperaturas para los años 1981 a 2014.



Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

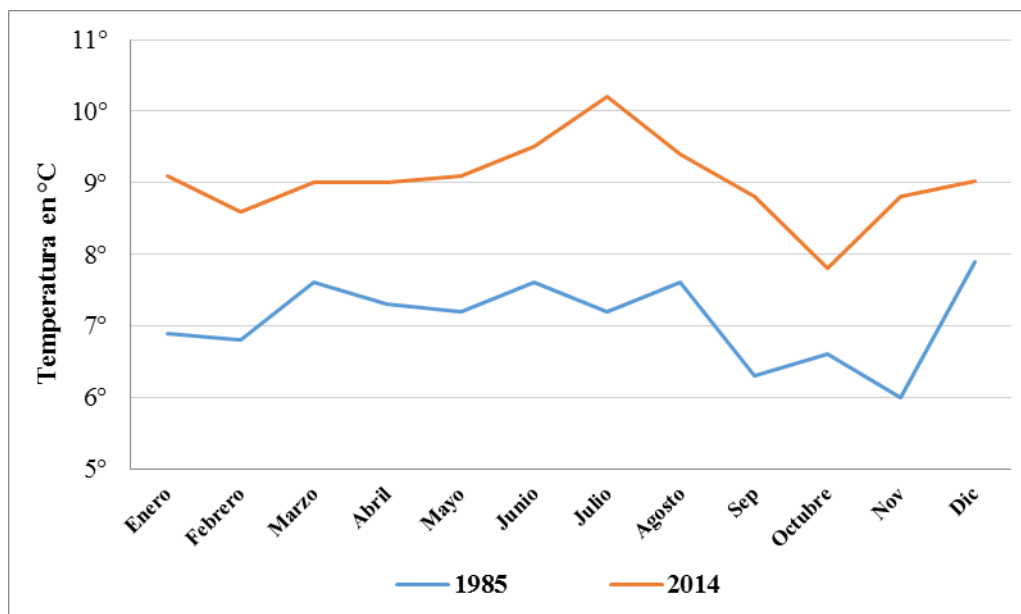
Gráfico 9. Temperaturas (°C) máximas absolutas para los años 1985 y 2014



Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

Los Gráficos 9 y 10 demuestran que las temperaturas máximas promedio y absolutas en estos dos años se han incrementado sin excepción alguna, teniendo como referencia para la máxima absoluta en el año 1985, un estado fluctuante entre 8° y 11,4°C señalando el mes de Marzo con el registro más alto y a Octubre con el más bajo, y un promedio de 9,6°C. El año 2014, tuvo como mes de mayor registro a Noviembre con 13,6°C y el de menor registro a Febrero con 11,4 °C obteniendo una diferencia de 2,2°C entre los dos años, con un promedio de 12,2°C. En concreto, la temperatura máxima absoluta tuvo para los dos años un ascenso de 2,6°C en promedio, lo que indica una tendencia al calentamiento en esta zona del Parque, además de indicar el cambio de fase fría a cálida de los meses del último trimestre del año. Una posible explicación para algunos de los incrementos puede ser la incidencia solar, que por ejemplo es mucho mayor en el mes de abril y en el mes de marzo por ser el final del periodo seco, el que posee un régimen de nubosidad mucho menor y por lo tanto debería haber mayor temperatura. También se puede pensar en la acción de la insolación solar sobre esta zona de acuerdo al mes del año, pues de acuerdo a la latitud se obtiene una mayor o menor irradiación en determinados meses del año.

Gráfico 10. Temperaturas máximas promedios para los años 1985 y 2014.



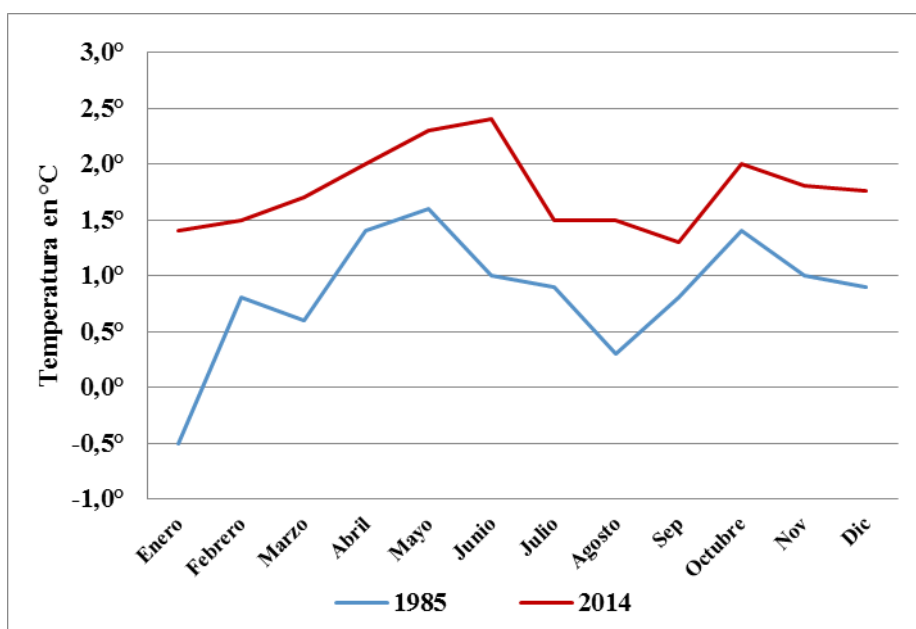
Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

Considerando el promedio de las temperaturas máximas mensuales para el año 2014, el mes más caluroso fue Julio con un valor de 10,2°C, y Octubre como el de menor registro con 7,8°C, teniendo así una diferencia entre estos dos de 2,4°C. Para el año 1985, la temperatura máxima estuvo por los 7,9 °C para el mes de Diciembre y la mínima con 6°C para Noviembre, resultando así una diferencia de 1,9°C. Las cifras anteriores indican un ascenso del promedio de la temperatura máxima de 1,9°C entre los dos periodos y se destaca el mes de Julio del año 2014 como uno de los más calurosos del registro, y así lo confirman los registros de las agencias mundiales de meteorología y clima.

Las temperaturas mínimas promedio (Ver Gráfico 11) para 1985 tuvieron una distribución bimodal, donde se produce una disminución para el segundo y cuarto trimestre del año, teniendo un intervalo de fluctuación de la misma entre los -0,5°C para el mes más frío y de 1,6°C para el de mayor registro. Estos meses de Enero y Mayo tienen una diferencia de 2,1°C respectivamente, y el año tuvo un promedio de 0,9°C. Las temperaturas para el año 2014 fluctuaron entre los 1,3°C en el mes de Septiembre y los 2,4°C para el mes de Junio

siendo el mes más caluroso; el promedio estuvo en los $1,8^{\circ}\text{C}$. La diferencia entre los dos periodos se puede observar en que la serie de los datos del 2014 posee una repartición más ceñida al promedio a diferencia del año 1985, lo que indica una menor dispersión respecto al promedio en $^{\circ}\text{C}$ o desviación típica, asimismo, determinando una condición donde las anomalías hacia los grados menores se hagan menos frecuentes y las condiciones sean más cálidas. En comparación los dos años tuvieron una diferencia de $0,9^{\circ}\text{C}$ en los promedios de las temperaturas mínimas.

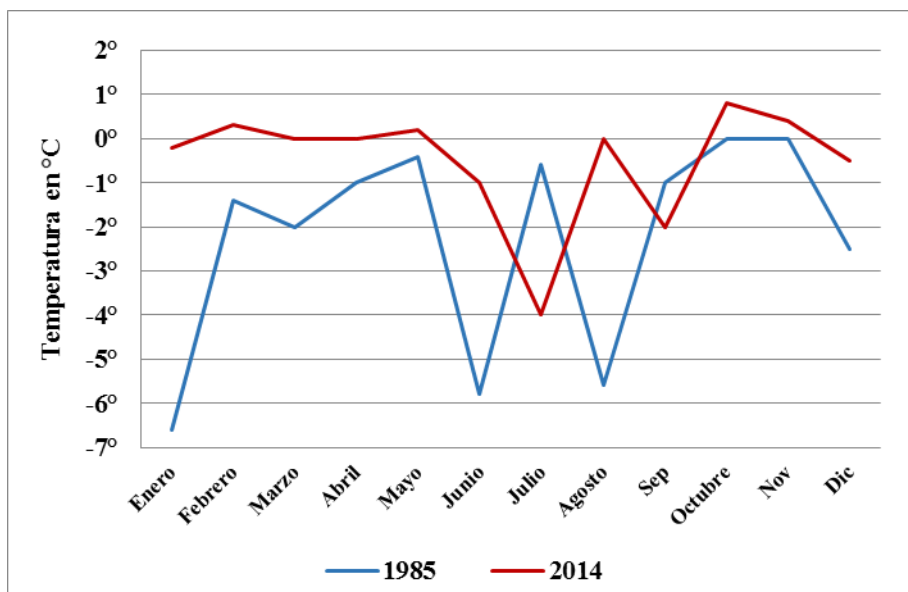
Gráfico 11. Temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) promedios para los años 1985 y 2014.



Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

Para las temperaturas absolutas, los datos arrojan una distribución muy interesante, pues como lo muestra el grafico 12, la temperatura mínima absoluta de julio de 1985 cambió radicalmente respecto al periodo en comparación, donde dicha variable descendió $3,4^{\circ}\text{C}$ en comparación al año más 2014, saliendo en contra de las tendencias de los promedios citados anteriormente y también, denotando una disminución considerable para los meses que normalmente se consideran como verano.

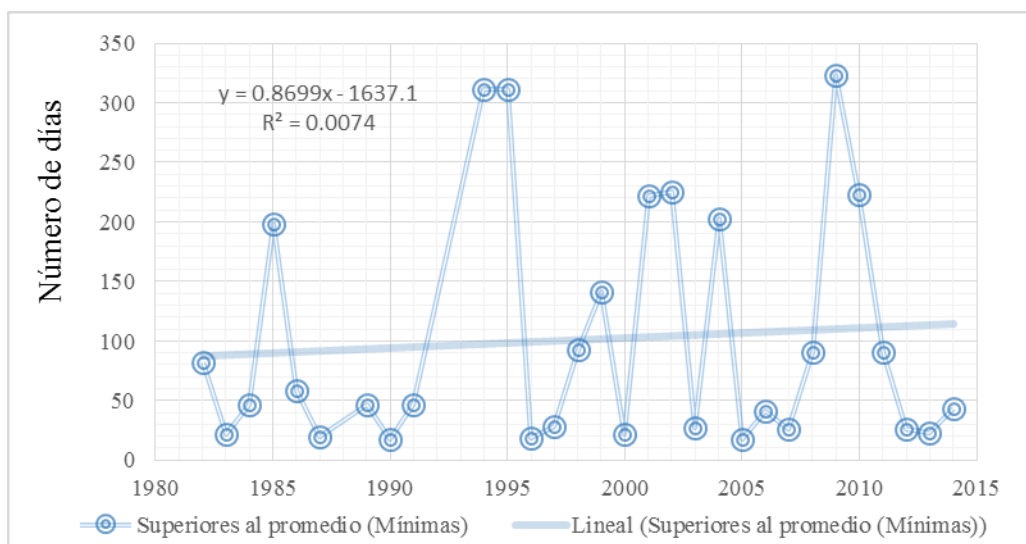
Gráfico 12. Temperaturas mínimas absolutas (°C) promedios para los años 1985 y 2014.



Fuente: Datos proporcionados por IDEAM (2015), modificado por el autor (2015).

En términos generales, la temperatura mínima absoluta en el año 1985 tuvo al mes de enero como el más frío alcanzando valores de $-6,6^{\circ}\text{C}$ y al mes Octubre y Noviembre como los menos fríos alcanzando la línea de los 0°C , con un promedio de $-2,2^{\circ}\text{C}$ y un umbral de distribución de $6,6^{\circ}\text{C}$. Para el año 2014, la temperatura tuvo a Octubre como el mes menos frío, igual que en el periodo anterior, llegando a los $0,8^{\circ}\text{C}$ y el mes más frío fue julio que alcanzo la línea de los -4° , con un intervalo de distribución de los valores de $4,8^{\circ}$, notablemente más reducido que en periodo anterior y un promedio total de $-0,5^{\circ}$ para el año completo. De lo anterior se puede concluir que los intervalos de distribución se hacen cada vez más reducidos, condicionando a los ecosistemas a vivir entre condiciones más cálidas sin posibilidad de enfriamiento súbito o anomalías, al igual que el incremento notable del promedio entre los dos años de aproximadamente $1,7^{\circ}\text{C}$.

Figura 25. Temperaturas mínimas que superan al promedio por año.



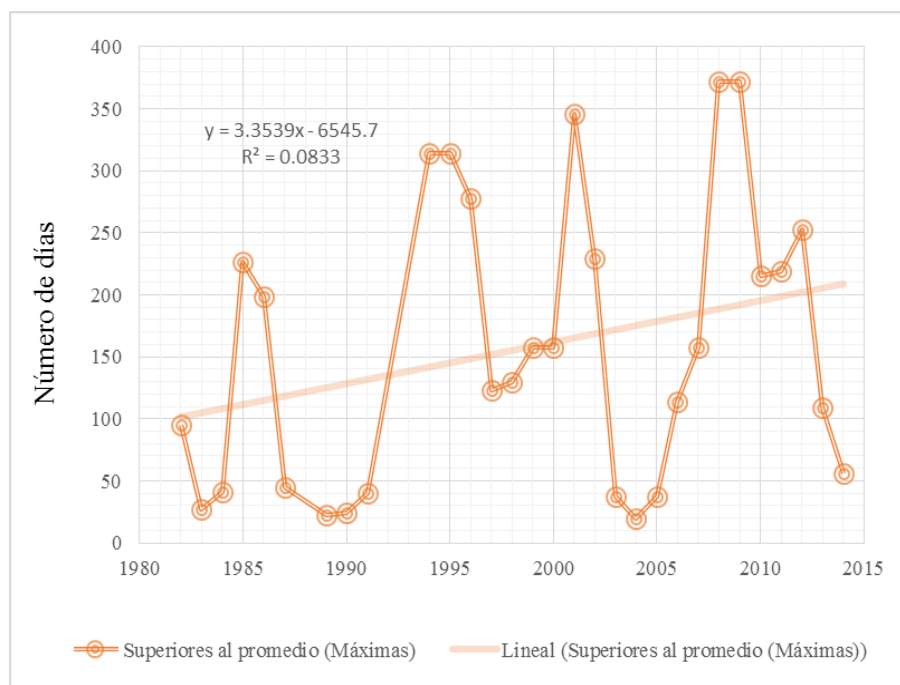
Fuente: Elaboración propia (2016).

En la figura 25, se muestra el cambio que han tenido las temperaturas mínimas para el periodo de tiempo 1985 - 2014. En el gráfico se puede apreciar como las temperaturas mínimas son cada vez más altas respecto a su promedio por año, esto quiere decir que los días con temperaturas bajas son en proporción, menores año tras año. Según la ecuación de la recta, la dispersión de los datos frente a la línea de tendencia es significativa, lo que indica que los datos poseen una distribución anormal.

En la figura 26, se observa como las temperaturas máximas superaban año tras año su promedio individual. Este gráfico nos indica además, que las temperaturas máximas son cada vez más variables respecto al promedio y que los días son más calurosos a medida que el tiempo avanza.

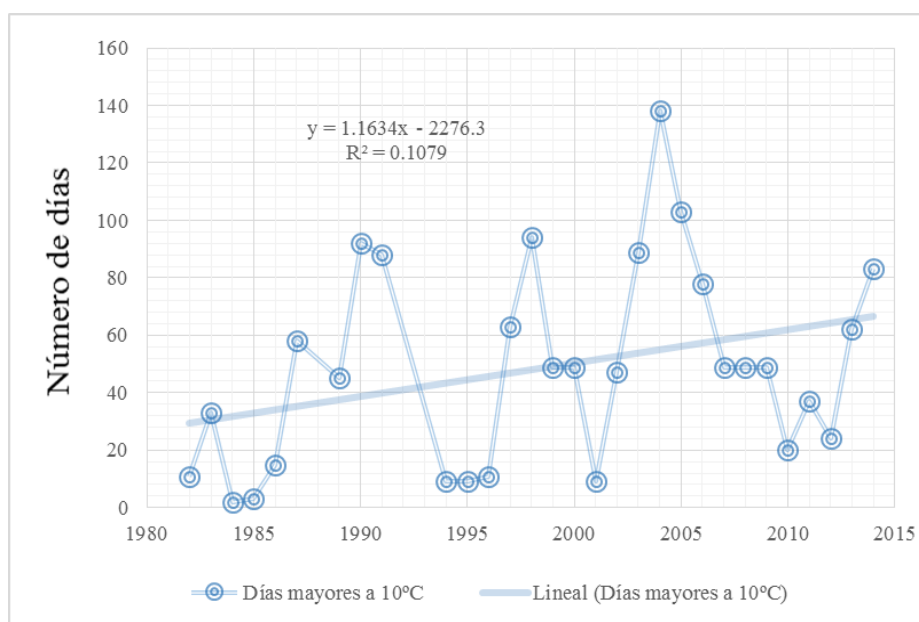
La figura 27 que se muestra más adelante, demuestra cómo es mayor la cantidad de días con temperaturas mayores a 10°C mediante el tiempo que pasa. Para los años 1981 y 1985 por ejemplo, se contaba entre 1 y 5 días con estas temperaturas, mientras que para los años 2014 o 2013 la cifra asciende hasta los 60 u 80 días por año.

Figura 26. Temperaturas máximas que superan al promedio por año.



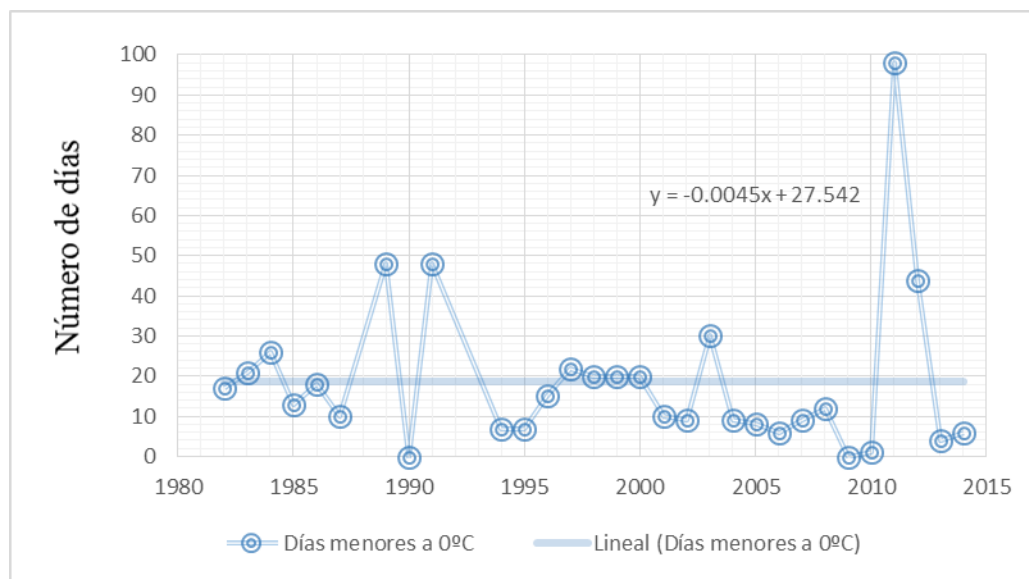
Fuente: Elaboración propia (2016).

Figura 27. Temperaturas mayores a 10°C.



Fuente: Elaboración propia (2016).

Figura 28. Temperaturas menores a 0°C.



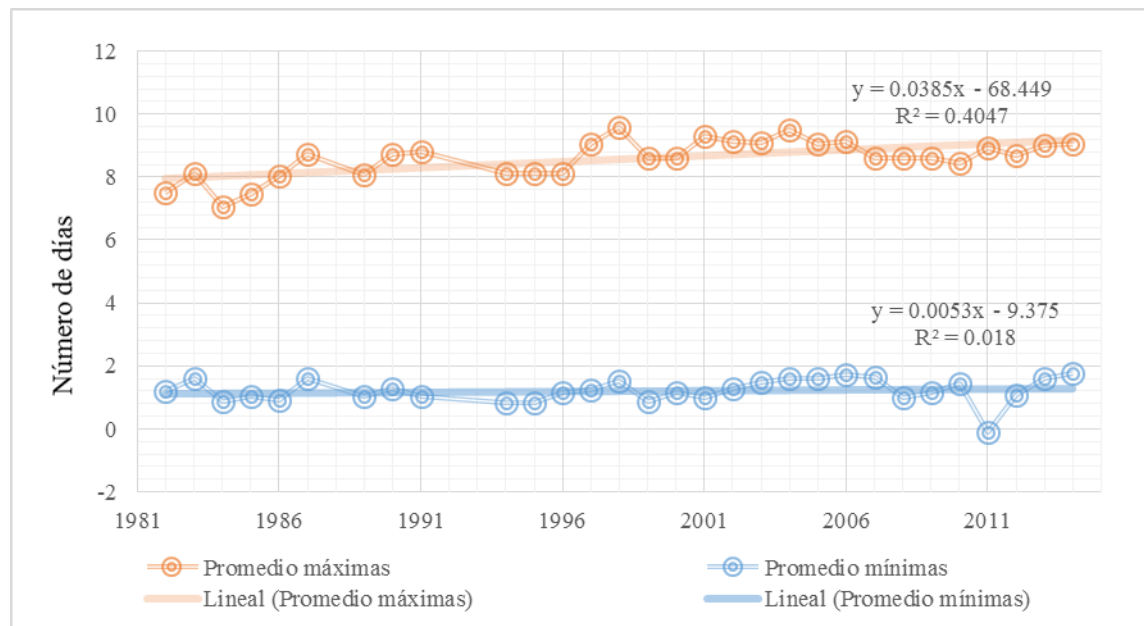
Fuente: Elaboración propia (2016).

Para los días con temperaturas menores a 0°C se muestra la figura 28, la que indica que los días con temperaturas menores a 0°C son cada vez menos frecuentes. En la gráfica se destaca la cifra de 98 y 48 días por debajo de 0° para los años 2011 y 2012 respectivamente, en los cuales hubo presencia del fenómeno de La Niña lo cual generó un decaimiento en las temperaturas alrededor del glaciar y de todo el país. Si se desestiman estos datos y se toman como valores anómalos, la pendiente de la línea de tendencia sería aún más negativa (**$y = -0.5773x + 1168.2$**), incrementando los valores de unos 25 días por año en promedio, a solo 2 o 3. Lo anterior es de vital importancia pues se entiende que el punto de congelación del agua es 0° en la escala Celsius, para que el glaciar de casquete del Nevado del Ruiz que está por debajo de los 5500 msnm logre tener un balance de masa positivo, requiere que las condiciones bajo cero predominen, lo que no se refleja en el gráfico mostrado anteriormente.

La figura 29 muestra la temperatura promedio de las temperaturas máximas y de las mínimas, lo que demuestra un incremento al final de la serie de las temperaturas máximas de aproximadamente unos 6 días más por encima del promedio de los primeros de la serie.

En el caso de las mínimas el incremento no es tan pronunciado y se mantiene en tan solo uno o dos días por el periodo de tiempo.

Figura 29. Promedios de temperaturas mínimas y máximas.



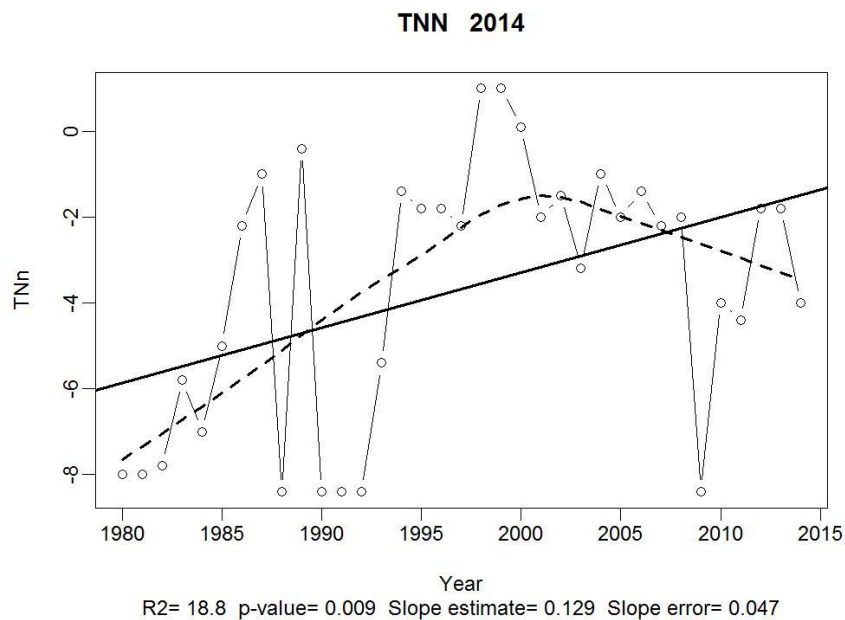
Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Índices de eventos extremos de cambio climático por medio de RClimdex:**

-

Para el análisis de los datos climáticos se usó también, la extensión del software estadístico R llamada RClimdex, la cual fue creada para lograr encontrar una serie de índices extremos de cambio climático, los gráficos presentados a continuación muestran los índices para las temperaturas en el periodo de tiempo 1981 a 2014 en la estación Las Brisas.

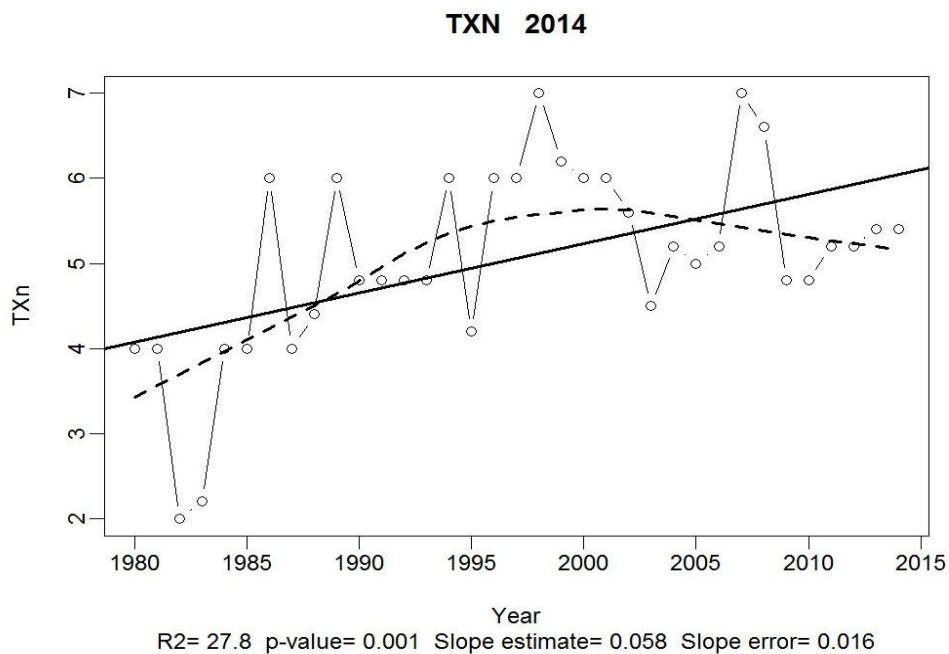
Figura 30. Temperaturas mínimas extremas.



Fuente: Elaboración propia (2016).

Según el índice TNN de temperatura mínima extrema (Ver Figura 30), se puede observar que esta variable ha aumentado aproximadamente 2°C desde los años 80 hasta el 2015. El valor de R2 explica en porcentaje, la relación que posee la variable de temperatura mínima respecto al tiempo, lo anterior quiere decir que el comportamiento ascendente de la temperatura está explicado en un 18.8% por el aumento de los años, el porcentaje restante está explicado por el error aleatorio. Por su parte la pendiente estimada es de 0.129, es decir que el aumento en cada año es de 0.129%, teniendo en cuenta un error de 0.047%.

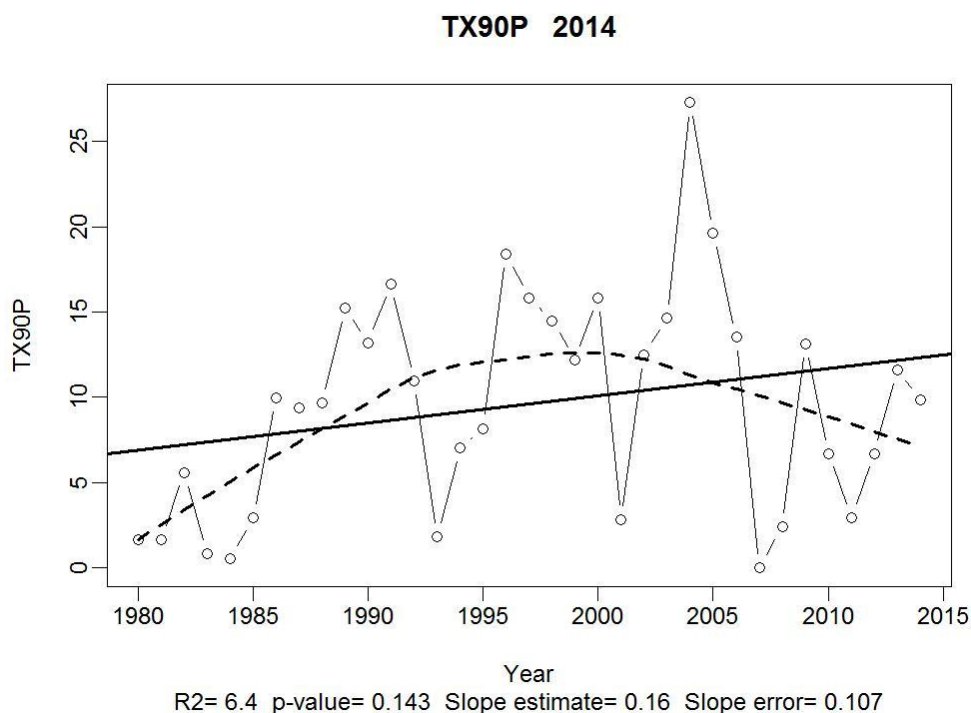
Figura 31. Temperaturas máxima más baja.



Fuente: Elaboración propia (2016).

El índice TXN (Ver Figura 31) hace referencia a los días con temperaturas máximas más bajas respecto al tiempo. Según la pendiente positiva del gráfico, los días con temperaturas máximas más bajas han sido más frecuentes con el aumento del tiempo con un error de 0.016%. Para el valor de R2 el cual explica en porcentaje la relación que posee la variable de temperatura máxima más alta respecto al tiempo, lo anterior quiere decir que el comportamiento ascendente de los días e los que la temperatura maxima es mayor esta explicado en un 27.8% por el aumento de los años, el porcentaje restane esta explicado por el error aleatorio.

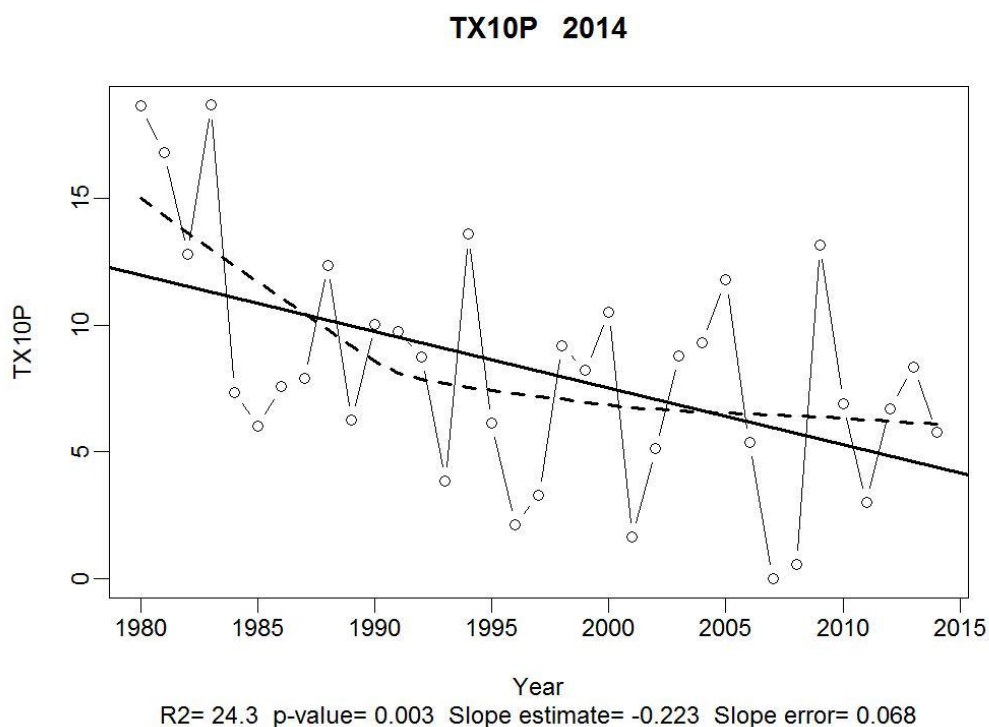
Figura 32. Días calurosos.



Fuente: Elaboración propia (2016).

La figura 32 muestra el índice de días calurosos por días. Según el índice, los días calurosos han sido cada día mucho más frecuentes, lo que indica que los días han sido menos fríos y la temperatura más alta. La pendiente estimada es del 0.16 es decir que el decrecimiento en cada año es de 0.16%, teniendo en cuenta un error de 0.012%. Para el valor de R2 el cual explica en porcentaje la relación que posee la variable de temperatura máxima respecto al tiempo, lo anterior quiere decir que el comportamiento ascendente de la temperatura esta explicado en un 6.4% por el aumento de los años, el porcentaje restante esta explicado por el error aleatorio.

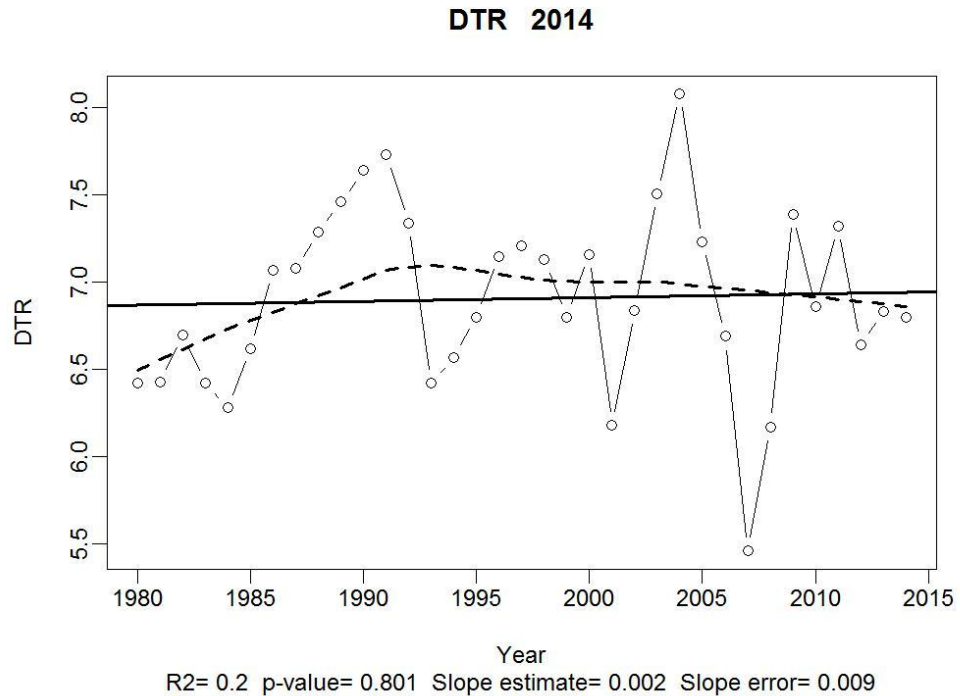
Figura 33. Días frescos.



Fuente: Elaboración propia (2016).

La figura 33 muestra el índice de días frescos respecto a los días de la temporalidad del estudio. Según el índice, los días frescos han sido cada día mucho menos frecuentes, lo que indica que los días han tenido las temperaturas menos frías pero sin llegar a extremos. La pendiente estimada es del -0.223 es decir que el decrecimiento en cada año es de 0.223%, teniendo en cuenta un error de 0.068%. Para el valor de R2 el cual explica en porcentaje la relación que posee las variables de temperaturas máximas y mínimas respecto al tiempo, lo anterior quiere decir que el comportamiento ascendente de la temperatura esta explicado en un 24.3% por el aumento de los años, el porcentaje restante esta explicado por el error aleatorio.

Figura 34. Rango diario de temperatura.



La figura 34 muestra el índice de rango diario de temperatura respecto a los años de la temporalidad del estudio. Según el índice, el rango de temperatura en °C ha sido año tras año mucho menos frecuentes, lo que indica que los días han tenido las temperaturas cada vez más altas y con mayor distribución. La pendiente estimada es del 0.002 es decir que el aumento en cada año es de 0.002%, teniendo en cuenta un error de 0.009%, esto indica que paa el años 1981 el rango llegaba hasta aproximadamente 6.85°C y para el 2014llego hasta los 6.97°C . Para el valor de R2 el cual explica en porcentaje la relación que posee la variabilidad del rango de las temperaturas respecto al tiempo, muestra que el comportamiento ascendente de la temperatura esta explicado en un 0.2% por el aumento de los años, el porcentaje restane esta explicado por el error aleatorio.

4.4 Análisis comparativo entre el comportamiento de la temperatura cerca al glaciar y los valores de pérdida de altura y área del mismo

A continuación se realiza una comparación de las cifras recolectadas en la investigación las cuales dan cuenta del comportamiento de la temperatura cerca al glaciar en la estación Las Brisas y los índices de pérdida de altura y área del glaciar derivados de la interpretación de las imágenes y el mapa antiguo.

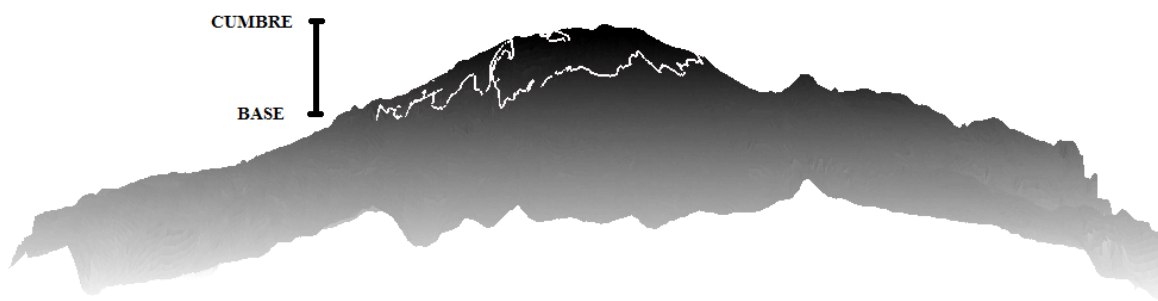
Tabla 19. Alturas para los años 1959, 1985, 1996, 2003 y 2014.

Altura Máxima	Año 1959 (msnm)	Año 1985 (msnm)	Año 1996 (msnm)	Año 2003 (msnm)	Año 2014 (msnm)
Cota 1 (N)	4119	4238	4368	4432	4600
Cota 2 (S)	4464	4624	4724	4968	4774
Cota 3 (W)	4131	4300	4490	4665	4649
Cota 4 (O)	4326	4350	4595	4668	4856
Promedio	4260	4378	4544	4638	4719
	Diferencia	118	166	94	81

Fuente. Elaboración propia (2015).

De la tabla 19 se concluye que los límites del glaciar están cada vez más altos, aproximándose hacia la cima y teniendo la capa helada cada vez menos extensión. En comparación, el glaciar para el año 1959, poseía lenguas que llegaban hasta los 4131 msnm, cifras que llaman la atención pues son bastante bajas con respecto al glaciar resultante del año 2014, pues en este año, todas las lenguas han desaparecido y solo queda un glaciar de casquete que tiene su altura menor hacia los 4600 msnm, casi 500 m más arriba del primer año. El glaciar entonces para el año 1959 tenía aún altura total de 1029 m desde su base (nieves perpetuas) hasta la cima, y para el 2014 el glaciar solo tenía una altura total de 570 m, 459 m menos que en 1959. Esta altura total se toma como se observa en la figura 36, con el fin de mostrar cual es el espacio físico de la montaña que ocupa el glaciar y para calcular cuánto es lo máximo que puede subir la línea de nieves perpetúas antes de que el glaciar se extinga.

Figura 35. Esquema de la toma de distancia vertical desde la altura inferior del glaciar hasta la cima del complejo volcánico.



Fuente. Elaboración propia (2015).

En la Tabla 20 se puede observar el consolidado de datos arrojados por la clasificación de las imágenes satelitales y los datos climáticos. En ellos se puede ver que la disminución en área es de casi el 60% y el ascenso de 130 m en la altura promedio, relacionado con el ascenso en 0,9°C de la temperatura. Estos datos son una evidencia más de que el glaciar posee una tendencia creciente al derretimiento, que se representa en la pérdida de área y altura, comparado con el cambio en la temperatura que al igual que la pérdida, también es ascendente.

Tabla 20. Comparación entre los datos del glaciar y las temperaturas para los años 1985, 1996, 2003 y 2014.

Año	Área (ha)	Altura (msnm)	Temperatura (°C)
1985	1686	4378	4,1°
1996	1336	4544	4,3°
2003	759	4638	4,8°
2014	617	4719	5,0°

Fuente. Elaboración propia (2015).

En la tabla 21 se evidencia que mientras mayor es la temperatura, mayor es igualmente el deshielo del glaciar, lo que hace pensar que exista la relación entre estas dos variables, teniendo en cuenta que el hielo y la nieve reaccionan con los cambios de temperatura. Los promedios de pérdida de altura y área del glaciar evidencian un proceso de disminución que se ha acelerado con los años, esta aceleración ha sido constante e ininterrumpida. Lo anterior es un ingrediente más de preocupación, ya que, a pesar de la disminución de la temperatura con la altitud, este factor no ha ayudado a aminorar el fenómeno del calentamiento y el derretimiento es continuo.

Tabla 21. Comparación entre los datos del glaciar y las temperaturas para los periodos 1959 - 1985, 1985 - 1996, 1996 - 2003 y para 2003 - 2014.

Años	Pérdida de área por año (ha)	Pérdida de altura por año (m)	Promedio de cambio de temperatura por año (°C)
1959 - 1985	14	5	0,6°
1985- 1996	32	15	0,2°
1996 - 2003	82	13	0,5°
2003 -2014	14	7	0,2°

Fuente. Elaboración propia (2015).

En la tabla 22, se muestran los datos finales para el área del glaciar derivados de la presente investigación, donde se muestra que el glaciar del volcán Nevado del Ruiz ha tenido un perdida desde 1959 hasta el 2014 del 70% de su masa glaciar, al igual que ha tenido un promedio de pérdida anual de casi 50 ha. Estos datos son alarmantes pues en comparación a estudios similares realizados en Colombia, Ecuador, Perú o Bolivia solo se pueden comparar con un caso y es el del glaciar Chacaltaya en este último país, que desde 1940 hasta 2007 había perdido casi el 90% de su extensión, casos extremos en los cuales las cubiertas heladas han sufrido las consecuencias del calentamiento progresivo de la temperatura.

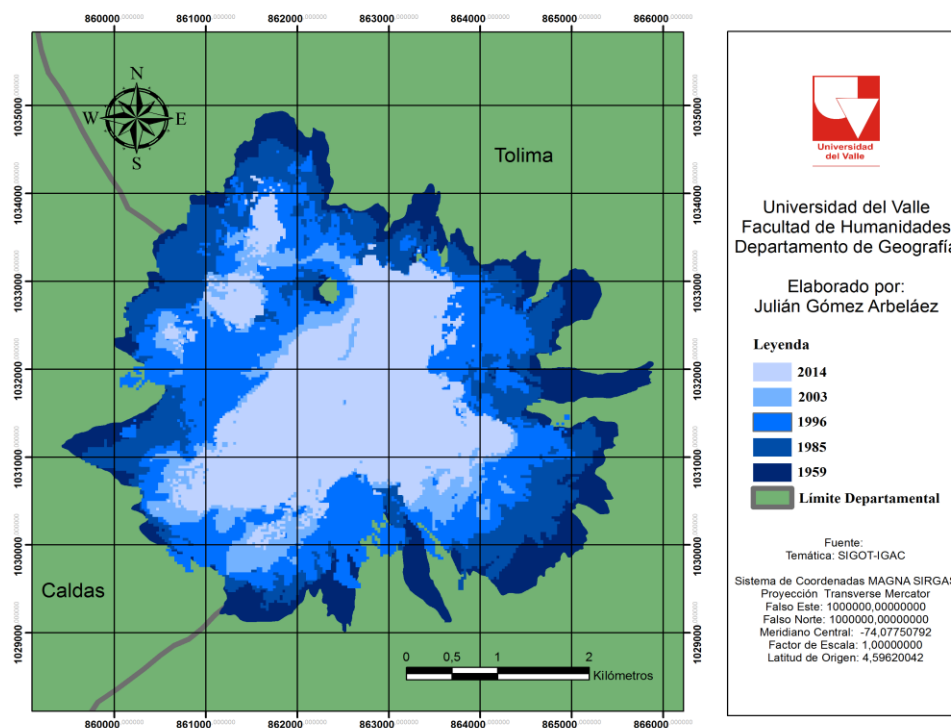
Tabla 22. Cifras finales del área del glaciar respecto a 1959.

Año	Área (ha)	Pérdida total desde 1959 (%)	Perdida por año
1959	2060		
1985	1686	20%	14 ha - 0,8%
1996	1336	45%	19 ha - 1%
2003	759	53%	29 ha - 1,4%
2014	617	70%	26 ha - 1,2%

Fuente. Elaboración propia (2015).

La Mapa 5 es el resultado final de la clasificación de las imágenes satelitales y el mapa antiguo, en él se visualiza la situación crítica en la que se encuentra el Glaciar debido a que hacia la zona noroccidental ya no posee hielo ni nieve solo algunos remanentes que se apilan en los picos cercanos al cráter.

Mapa 5. Estado del glaciar del nevado del Ruiz para los años 1959, 1985, 1996, 2003 y 2014.



Fuente. Elaboración propia (2015).

Este último apartado, es una proyección del comportamiento del glaciar enfrentado a las condiciones actuales de pérdida de área si se replican año por año hacia el futuro. Se realizó entonces, una descripción de las condiciones para este último año del estudio, y se utilizó los mismos promedios hacia los años venideros, lo que dio cifras contundentes (Ver Tabla 23).

Tabla 23. Datos de pérdida de área del glaciar entre los años 1959 y 2014.

Año	Área (ha)		
1959	2060	Diferencia (ha)	Perdida por año
2014	617	1443	26 ha - 1,20%

Fuente. Elaboración propia (2015).

Según las cifras arrojadas por el estudio, entre 1959 y 2014 el glaciar tuvo una pérdida anual de 26 has siendo aproximadamente el 1,2% de su área para el año inicial. Si suponemos que esta pérdida se sigue repitiendo, tendríamos que para el año 2040 no existirían rastros del glaciar del nevado del Ruiz. Según este estudio, al glaciar del volcán Nevado del Ruiz le quedan 25 años de vida.

4.5 Resultados de la matriz de confusión.

Como se puede observar en la Tabla 24, la clasificación realizada obtuvo un Kappa de 0,5 que se puede interpretar como una clasificación concordante.

Tabla 24. Matriz de confusión.

		Clasificado				
	Clase	Nieve	Nubes	No nieve	Suma	%
Observado	Nieve	50	0	0	50	33,3
	Nubes	0	30	20	50	33,3
	No nieve	15	15	21	50	33,3
	Suma	65	45	41	150	
	%	43,0	29,8	27,2		
	Acuerdo Observado		66,89			
	Número de casos por azar		50,27			
	% casos por azar		33,29			
	Kappa Coefficient		50,36			

Fuente. Elaboración propia (2015).

Como resultado se encontró con que los pixeles del total que eran nieve ahora solo se conservan en esa misma clase poco más de un 38% como se puede observar en la tabla 24.

4.6 Discusión:

Según la interpretación del mapa realizado por Wilfred Linder el área del glaciar para el año 1959 era de 2060 ha, lo que da cuenta de una extensión muy grande de la masa helada. Según la metodología planteada por Flinnt (1971), la altura promedio del casquete para este año fue de 4457 msnm, teniendo como punto más bajo de alcance de las nieves los 4260 msnm hacia la zona Sur y como punto más alto, los 4790 msnm hacia norte. Para el 13 de marzo de 1985 el área del glaciar era de 1686 has, lo que representa una disminución del 18% respecto al año 1959, perdiendo alrededor de 374 has. La altitud del glaciar, en promedio fue de 4526 metros, lo que evidencia un ascenso de la cota de nieve de 70 m en vertical, en comparación al existente en el año 1959. La parte más baja del glaciar se ubicó a 3910 msnm. en la cota de muestra aleatoria del glaciar; en cambio la más alta se localizó a 4980 msnm de altitud en la cota o. Para el año 1996 el área se había reducido en 350 ha teniendo un total de 1336 ha de casquete glaciar. Lo anterior es un casi un 70% de lo que había en 1959. Las alturas demuestran también un ascenso en 280 m en las nieves perpetuas. Para el año 2003, el área estaba en 759 ha, cifra muy cercana a la de la temporalidad 2014 pero muy alejada de 1993, pues en este periodo de tiempo se redujo 577 ha sin que existieran procesos volcánicos agresivos que pudiesen afectar la capa de hielo. Este proceso observado en este periodo de tiempo llama la atención pues en muy poco tiempo el glaciar tuvo una pérdida significativa, eso puede deberse a que los días calurosos fueron mucho más frecuentes en la primera década del siglo XXI respecto a las temperaturas anteriores como lo demuestra el índice TX90p. Para el año 2014, el glaciar poseía tan solo un 30% de lo que existía en 1959 y un 37% de lo que existía 1985, con una reducción entonces del 63% desde 1985 y de 70% desde 1959. Estos datos dan cuenta de una tendencia la desaparición de la masa glaciar si las condiciones se mantienen, que también con el tiempo se ha vuelto aún más agresiva, pues como lo indican estas cifras, la desaparición ha sido más rápida a medida que pasan los años.

En el primer periodo, entre los años 1959 y 1985 la reducción de la masa del glaciar fue de 18%; no obstante entre 1985 y 2014 la reducción fue del 63%; pero si se mira todo el

periodo (entre 1959 y 2014), la reducción alcanza el 70%. Respecto a la altura de la cota glaciar, se demuestra un ascenso del nivel promedio de la línea de nieves con una diferencia de 630 m respecto al periodo 1959 - 2014.

Los datos presentados en este punto, evidencian tendencia a la desaparición que ha tenido el glaciar del Ruiz, al igual que los demás glaciares tropicales en nuestro país y en el globo. En trabajos realizados en torno a estas coberturas heladas en Suramérica como por ejemplo, el de Llinás & Meneses (2004) en el glaciar hermano de Santa Isabel o más hacia el Sur, en los glaciares peruanos realizado por Portocarrero (1995), se encontró entonces que el proceso de deshielo de los glaciares naturales se ha visto afectado por procesos diferentes a la dinámica natural de hielo y deshielo que en consecuencia, condicionan a estos ecosistemas a desaparecer en este siglo. Adicionalmente, otro ingrediente que se le suma al proceso mencionado, es la aparición más frecuente de oleadas de calor y del fenómeno de variabilidad climática El Niño que produce un calentamiento mayor en esta zona del Ecuador y en consecuencia un aceleramiento del proceso de ablación de las coberturas heladas en los trópicos. El mensaje de estos trabajos radica en la necesidad que tiene la sociedad actual ante el reto que se avecina por la desaparición de unas de las principales fuentes de abastecimiento de agua en los países pobres del mundo. Lo anterior enfrenta a los dirigentes de estos países a encontrar estrategias para lograr que estas poblaciones no se vean muy afectadas.

El glaciar del Ruiz en conjunto con el glaciar de Santa Isabel y los páramos que allí existen son los responsables de abastecer aproximadamente 2 millones de personas en su zona de influencia y especialmente, en el eje cafetero. Las ciudades de Pereira, Santa Rosa de Cabal y Manizales, con el deshielo de este glaciar se verán afectadas directamente pues el flujo continuo desde la laguna del Otún en el caso de Pereira y toda la red hídrica que allí se produce sería cada vez menor y de más difícil acceso. De hecho, ya se están generando conflictos por el uso del agua en la zona alta de la cuenca del río Quindío y Otún, pues no se pueden vender o dividir lotes de tierra en más fracciones en las que ya están porque no tendrían abastecimiento de agua. Lo mismo pasa en los ríos Chinchiná y Gualí, en los

cuales no solo la sobreocupación esta generando estragos, sino también la tala de bosques y la agricultura extensiva. Según la municipalidad del municipio de Santa Rosa de Cabal, se están realizando estudios de costos y de viabilidad para construir un embalse multipropósito para abastecer esta zona del preciado líquido, pero se deben tener en cuenta que se podían generar unos impactos sociales asociados que podrían repercutir negativamente en la población de la zona, en este caso se perderían millones de hectáreas de suelo cultivable y las familias de la región deberían verse obligadas a abandonar su lugar de habitación para trasladarse a otro lugar. Desafortunadamente, el deterioro del parque no ha sido únicamente por condiciones propias de las dinámicas de la geósfera, existe además presión por ampliación de la frontera agrícola con el consiguiente deterioro de las zonas de bosque, y una desordenada actividad turística en sectores muy próximos al Parque como lo informa la oficina de Parques Nacionales Naturales y sus guardabosques. También se registran problemas por cacería, principalmente en la zona de Cortaderal en el municipio de Santa Rosa de Cabal.

Con lo anterior se demuestra que el panorama para el Glaciar del Volcán Nevado del Ruiz no es muy prometedor, pues se están generando impactos no solo directamente sobre su cobertura, también se está afectando la zona baja del cono volcánico y se están vulnerando los ecosistemas de alta montaña generando así una mayor afectación al conjunto de hábitats que conforman el Parque Nacional Natural Los Nevados.

5. CONCLUSIONES

Los datos recopilados en esta investigación, sugieren que el glaciar del volcán Nevado del Ruiz ha tenido un retroceso y de pérdida de masa que se ha mantenido en el tiempo hasta nuestros días, con tendencia a desaparecer si las condiciones determinadas en este estudio se mantienen, el glaciar desaparecerá en menos de dos décadas.

Los glaciares de Colombia y su estudio, son de vital importancia para el país pues de ellos depende aproximadamente el abastecimiento de casi el 70% de la población total, sin contar que la elevación de las temperaturas y los cambios drásticos medioambientales destruirían las dinámicas de los ecosistemas de alta montaña como los páramos y los bosques alto andinos, lo que acarrearía una serie de consecuencias como la reducción del hábitat de especies animales y vegetales que se encargan de mantener el equilibrio ecosistémico en estas zonas de la geografía nacional.

En esta investigación se identificaron cambios drásticos de área y altura del glaciar del Volcán Nevado del Ruiz; estas cifras indican que el glaciar ha perdido mas del 60% de su área en los 59 años del estudio y además, que ha ascendido 319 m en vertical desde la línea de nieves perpetuas hasta su cima. Estos datos son evidencias de un proceso de derretimiento que se puede ver recrudecido por el incremento de las temperaturas promedio en la zona que ha estado alrededor de 1°C, sumándole que los episodios calurosos como El Fenomeno de El niño son cada vez más frecuentes y la dispersión de la temperatura frente al promedio es menor, pero igualando a la tendencia general mundial la cual indica que es cada vez más alta.

Igualmente la variación inversa entre la temperatura (aumentando) y el glaciar (disminuyendo) han ido de la mano según todos los valores arrojados por los datos climáticos y la interpretación de imágenes y mapas. Para el periodo 1959 - 1985 la temperatura tuvo un cambio en promedio de 0,5°C y para 1985 - 2014 de 0,9°C lo que evidencia que la temperatura ha tenido un claro incremento desde el inicio del estudio pero

que además se ha visto acelerado para el periodo final de la investigación, lo que apoya las cifras de área y altura del glaciar donde se demuestra que el glaciar ha perdido aún más masa para el segundo periodo que el primero.

Según los datos obtenidos en la investigación, se estima que el glaciar ya no va a estar presente en el cono volcánico del Ruiz para el año 2040 si las condiciones a 2014 se mantienen. Este dato es alarmante porque a las comunidades que se abastecen de agua del glaciar solo les quedan poco menos de 25 años para preparar planes de contingencia que les ayuden a superar los inconvenientes a futuro que les trae la pérdida de una fuente importante del recurso vital. Esto se puede ver desde diferentes perspectivas, porque el cambio en las temperaturas hace que el glaciar desaparezca pero de la misma forma hace que algunas zonas a alturas bastante pronunciadas cambien su vocación y puedan ser utilizables para el arado, cultivo y cosecha.

Las capas heladas del país y en especial la zona nevada y congelada de la cima del Volcán Nevado de Ruiz, ofrecen una serie de amenazas naturales como el posible derretimiento masivo del glaciar y posterior avalancha de lahares por una erupción, o una simple avalancha detonada por un evento sísmico. Estas amenazas podrían convertirse en desastre para algunas localidades aledañas al cráter como Villamaría o Murillo. Por lo anterior es de vital importancia el continuo monitoreo, análisis y estudio del glaciar, para lograr reconocer dichas amenaza y lograr prevenir desastres como el ocurrido en Armero – Guayabal en Noviembre del 1985.

El estudio de los glaciares en el mundo nos ayuda a comprender su dinámica interna que a su vez, descubre cada día más nuevas herramientas que nos brindan estas coberturas heladas sobre el comportamiento del sistema climático a lo largo de millones de años y también, en él se pueden encontrar vestigios de erupciones anteriores con las cuales se puede reconocer de mejor manera el comportamiento a largo plazo del volcán. Es de vital importancia que los organismos colombianos encargados del tema ambiental y a la comunidad en general, ofrezcan un mayor interés en estos temas pues hasta ahora han sido trabajos independientes los que han abordado el tema.

5. RECOMENDACIONES

Se debe promover el estudio de la glaciología y criología en Colombia, pues del agua proveniente de los nevados depende además, una gran cantidad de la población de nuestro país. Con el acelerado crecimiento de nuestra población, el abastecimiento del recurso hídrico va a ser cada vez mucho más complejo. En este sentido, el estudio de estos ecosistemas lograría mitigar un poco los efectos contrarios que se ejercen sobre las dinámicas sociales y ambientales que lo aquejan, logrando así posiblemente, extender un poco más su vida útil.

En Colombia no se cuenta con estudios rigurosos de glaciología que ayuden a monitorear el estado de las coberturas heladas, lo que genera una acumulación de riesgos que puede desencadenar un desastre no solo natural sino social. Se recomienda un mayor seguimiento por parte de los institutos encargados del tema ambiental en el país. Además, el nevado del Ruíz aún sigue siendo una amenaza para los centros poblados de sus alrededores, es por esto que se necesita un mayor monitoreo por parte de las entidades estatales encargadas del tema.

7. BIBLIOGRAFÍA

Araos, José; Godoi, Maria Angelica & Carvallo, Rubén. *Adelgazamiento y dinámica en la zona de ablación del glaciar Tyndall, Campo de Hielo Patagónico Sur*. Anales del Instituto Patagonia, Vol. 35 (1): 19 – 27. Santiago de Chile, Chile. Año 2007.

Alonso, C., & Moreno, V. *Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica*. Revista de Teledetección, 7, 35-47. Año 1996.

Ariza, Alexander. *Análisis del retroceso de glaciales tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes LandSat*. Revista Cartográfica Vol. 82 del Instituto Panamericano de Historia y Geografía – IPGH. Año 2006.

Cáceres, B., Francou, B., Favier, V., Bontron, G., Maisncho, L., Tachker, P., ... & Chazarin, J. P. El Glaciar 15 del Antisana. Diez años de investigaciones glaciológicas. In *Memorias de la Primera Conferencia Internacional de Cambio Climático: Impactos en los sistemas de montaña, Bogotá, Colombia*. In: http://mri.scnatweb.ch/dmdocuments/Articulo_Colombia.pdf. Año 2005.

Castaño Santiago, Ruiz José & Vela Alicia. *La teledetección. Sus bases*. Artículo. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) & Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011* Bogotá: Misión BID - Cepal. Año 2010.

Chander, Gyanesh, Markham, Brian L. & Barsi, Julia. *Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration*. IEEE geoscience and remote sensing letters, vol. 4, no. 3. Año 2007.

Chuvieco, Emilio. (2008) *Teledeteccion ambiental*. Editorial Ariel S.A. Barcelona, España. ISBN 978-84-344-8073-3. Año 2008.

Comunidad Andina de Naciones – CAN. *El fin de las cumbres nevadas. Glaciares y cambio climático en la Comunidad Andina*. Publicado por la Secretaría General de la Comunidad Andina, el Instituto de Investigación para el Desarrollo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe y la Agencia Española de Cooperación Internacional. Lima, Perú. Año 2007.

Comisión Europea. *El cambio climático, ¿Qué es?, introducción para jóvenes*. Luxemburgo. Año 2006.

Caceres, Bolivar et al. *El glaciar 15 del Antisana investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico*. Climate Variability and Change – Hydrological Impacts (Memorias de la quinta FRIEND World Conference held IAHS Publ. 308, 2006. Havana, Cuba. Año 2006.

Cáceres, R. *Movimiento límite de los bosques de Polylepis en relación al retroceso glaciar en la microcuenca Quillcay-Ancash*. Año 2007.

Duque, Gonzalo. *Las lecciones del Ruíz a los 25 años del desastre de Armero*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. Año 2010.

Flinnt, R. *Glacial and quaternary geology*. Nueva York, Estados Unidos de América. P 892. Año 1971.

Francou, Bernard & Pizarro, Luis. *EL Niño y la sequía en los Andes centrales de Perú y Bolivia*. XV Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos. No. 1 - 2, pp. 1-18. Año 1985.

Greenpeace. *Cambio climático. Futuro Negro para los páramos*. Bogotá, Colombia. Año 2009.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad*. (Incluido en resumen para responsables de políticas). Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC, 1997. ISBN: 92-9169-310-3. Año 1997.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso). Año 2014.

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

Hyndman, R.J., y Y. Fan. *Ejemplos de cuantiles en paquetes estadísticos*. El Estadístico de América Vol. 50. P. 361 - 367. Año 1996.

Instituto de Hidrología. Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. *Los glaciares colombianos como expresión del cambio climático*. Bogotá. Colombia. Año 2013.

Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS (Ahora Servicio Geológico Colombiano). *Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas*. Bogotá, Colombia. Año 2010.

IGAC. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Bogotá, Colombia. Año 2013.

Karl, T. R., N. Nicholls, & A. Ghazi. *CLIVAR/GCOS/WMO - Taller sobre índices e indicadores para los extremos climáticos - Resumen del taller*. Cambio Climático Vol. 42, p. 3-7. Año 1999.

Linder, Wilfred. *Perdidas en la masa de hielo en el nevado del Ruíz causadas por procesos climáticos y eruptivos durante los últimos 50 años*. Revista Análisis Geográficos No. 23 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. Año 1993.

Lu, D., Mausel, P., Brondizios, E. & Moran, E. *Técnicas de detección de cambios*. International Journal of Remote Sensing. Volume 25, Issue 12, paginas 2365-2401. Año 2004.

Medina, G., & Mejía, A. *Incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el comportamiento de glaciares tropicales en Perú*. En revista ECIPerú de ciencia y tecnología, Lima, Perú. Volumen 7 - No 2 - Año 2010, 21 – 27. Año 2010.

Mendoza, Alberto. *Armero y Quindío: Zonas de desastre, reconstrucción y oportunidades de desarrollo*. Sociedad Geográfica Colombiana. En: <http://www.sogeocol.edu.co/web/>. Año 1999.

Mendizabal, Marthadina. *El retroceso de los glaciares: Termómetro del cambio climático*. Revista virtual REDESMA, Vol 2. (3). Año 2008.

ONU – IDEAM. *Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Colombia. Año 2008.

Organización de Naciones Unidas. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, Estados Unidos de América. Año 1992.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. *Alimentar el mundo, erradicar el hambre*. Roma, Italia. Año 2009.

Organización de las Naciones Unidas – ONU. *La situación demográfica del mundo en 2014. Informe conciso*. Nueva York, Estados Unidos de Norte América. Año 2014.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. *Plan de manejo del parque Nacional Natural los Nevados. Resumen ejecutivo*. Medellín, Colombia. Año 2007.

Peterson, T. C. *Climate Change Indices*. Boletín de la Organización Meteorologica Mundial No. 54, p. 83-86. Año 2005.

Portocarrero, César. Retrocesos de glaciares en Perú: Consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos. Boletín del Instituto Frances de Estudios Andinos. 24 (3): 697-706. Huaraz, Perú. Año 1995.

Reuter, Alberto Fabian. *Principios de teledetección*. Serie didáctica no. 3 Facultad de ciencias Naturales – Universidad Nacional de Santiago del Estero. Año 2009.

Seco Hernández, Ricardo. *Teledetección aeroespacial*. Editor: F. Varela, ISBN, 959258348X, 9789592583481. 156 paginas. Año 2002.

Sievers, Wilfred. El presente de la glaciación en Sudamerica. P 184 – 205. Año 1911.

Tarbuck, Eward J.; Lutgens, Frederick K. & Tasa, D. *Ciencias de la Tierra. Introducción a la geología física. 8va edición*. Pearson Educación S. A. Madrid, España. Año 2005.

Theau, Jerome. *Detección de cambios*. Encyclopedia of GIS. pp 77 - 84. Springer.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO. *Estudios de caso. Cambio climático y patrimonio cultural*. Paris, Francia. ISBN: 978-92-3-304125-7. Año 2009.

Vasquez Aguirre, Jose Luis. *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. Desarrollada en el marco del Proyecto: fortalecimiento de capacidades en detección de cambio climático en México. p. 24 - 70. Año 2010.

Viera, Anthony J., & Garrett, Joanne M. *Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic*. Revista Family Medicine. Volumen 37. No. 5. P 60 – 363. Año 2005.

Zhang, X., G. Hegerl, F.W. Zwiers, y J. Kenyon. *Como evitar la falta de homogeneidad de los índices basados en los percentiles de las temperaturas extremas*. Climate Journal. Año 2004.

Zeballos, G., Soruco, Á., Cusicanqui, D., Joffré, R., & Rabatel, A. *Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia*. Ecología en Bolivia, 49(3), 14-26. Año 2014.

Páginas Web consultadas:

Agencia Espacial Europea. Actualizada: 2006. [Fecha de consulta: 12 de marzo de 2015].
Disponible en: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMX7BANJTF_0.html

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Actualizada 2015. [Fecha de consulta: 12 de marzo de 2015]. NCEP – NCAR.
Disponible en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

ANEXO 1. Promedios multianuales de temperaturas para el periodo 1959 – 1983, tomado de Wilfred Linder (1983).

TABLA A 5: PROMEDIOS ANUALES DE LAS PRECIPITACIONES Y DE LAS TEMPERATURAS

Estación	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Suma y/o Promedio
Cenicafé	133.0	145.0	204.0	265.0	263	196.0	150.0	172.0	206.0	299.0	252.0	175.0	2462.0
El Cedral	20.7	21.9	21.2	22.4	20.6	20.5	22.1	20.8	20.4	20.0	20.0	20.4	20.9
El Palmar	210.0	200.0	220.0	354.0	264	170.0	91.0	111.0	157.0	398.0	341.0	248.0	2764.0
El Paso	14.8	14.9	15.1	15.0	15.1	15.2	15.4	15.2	14.9	14.3	14.4	14.6	14.9
La Esperanza	48.0	62.0	89.0	140.0	206	147.0	102.0	145.0	180.0	159.0	115.0	77.0	1470.0
Las Brisas	99.0	99.0	136.0	187.0	182	151.0	125.0	92.0	94.0	229.0	254.0	181.0	1831.0
Las Juntas	8.8	8.7	8.8	8.8	8.8	8.3	7.8	7.9	8.1	8.3	8.4	8.5	8.4
Las Palomas	78.0	107.0	148.0	216.0	240	175.0	118.0	126.0	172.0	241.0	196.0	123.0	1933.0
Libano	9.1	9.7	8.7	9.1	9.2	8.6	8.6	8.8	8.3	8.1	8.5	8.6	8.8
Murillo	69.0	74.0	114.0	202.0	225	80.0	51.0	32.0	84.0	199.0	146.0	90.0	1346.0
Naranjal	4.0	4.3	4.6	4.5	4.6	4.1	4.1	4.3	3.5	3.8	4.0	3.9	4.1
Nev. del Ruiz	60.0	91.0	93.0	201.0	204	178.0	101.0	148.0	191.0	240.0	113.0	84.0	1704.0
Papayal	132.0	115.0	148.0	269.0	224	165.0	93.0	105.0	150.0	363.0	307.0	162.0	2253.0
Santa Isabel	12.8	12.8	13.0	12.7	12.9	12.8	12.8	12.7	12.8	12.2	12.4	12.7	12.7
	117.0	139.0	212.0	289.0	242	154.0	113.0	122.0	214.0	300.0	251.0	147.0	2300.0
	18.8	18.9	19.1	19.0	19.1	19.0	19.0	19.1	19.0	18.6	18.5	18.8	18.9
	115.0	120.0	181.0	278.0	261	176.0	120.0	136.0	220.0	242.0	223.0	132.0	2196.0
	140.0	154.0	196.0	290.0	316	219.0	176.0	213.0	205.0	289.0	279.0	178.0	2657.0
	20.7	20.9	20.9	20.7	20.7	20.5	20.7	20.7	20.5	20.0	20.0	20.4	20.6
	0.3	0.1						-0.6	-0.2	0.5	0.2	-0.1	0.0
	126.0	132.0	194.0	245.0	278	182.0	96.0	134.0	169.0	248.0	191.0	147.0	2145.0
	106.0	157.0	180.0	266.0	283.0	156.0	121.0	165.0	212.0	315.0	269.0	131.0	2384.0

ANEXO 2. Valores máximos diarios de temperatura en la estación Las Brisas, IDEAM (2015).

IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2015/03/09
LATITUD 0454 N
LONGITUD 7521 W
ELEVACION 4150 m.s.n.m

VALORES MAXIMOS DIARIOS DE TEMPERATURA (°C)
ANO 2004

ESTACION : 26155150 BRISAS LAS
FECHA-INSTALACION 1981-OCT
FECHA-SUSPENSIÓN

DIA	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
01	12.2	11.3	12.2	7.8	8.6	6.4	11.0	10.4	8.0	6.3	8.0	9.6
02	12.3	11.1	11.0	8.4	7.2	8.0	10.0	10.0	11.0	9.8	8.0	7.2
03	12.2	11.4	7.2	8.0	7.6	10.0	10.1	10.0	11.4	11.0	6.4	7.2
04	12.5	11.0	10.0	10.6	8.0	8.0	11.0	9.0	8.0	6.4	8.4	9.6
05	11.0	11.0	8.0	12.5	8.0	6.0	10.0	8.6	11.2	8.0	11.0	
06	12.6	12.0	7.0	12.7	10.0	11.4	10.0	9.2	9.0	7.8	8.6	8.7
07	11.8	7.0	13.8	11.0	11.0	11.0	11.4	8.4	5.8	8.0	8.0	
08	10.0	8.0	11.0	12.7	13.0	11.0	7.0	10.6	5.4	6.8	8.0	9.4
09	10.6	11.0	11.1	7.4	11.2	8.0	13.6	6.0	9.4	6.0	10.4	
10	8.0	9.6	10.8	8.0	11.0	9.6	7.6	10.0	6.0	7.2	7.0	8.0
11	8.6	9.6	10.8	7.0	11.0	12.6	6.4	11.4	6.0	8.2	10.4	7.2
12	9.1	8.8	10.6	8.0	10.4	13.8	11.0	11.0	6.0	9.8	9.4	8.0
13	11.9	8.6	11.6	12.8	13.0	12.6	10.4	11.0	8.8	9.4	9.4	7.8
14	13.6	9.0	11.6	13.0	12.8	10.0	9.2		7.1	11.0	6.4	10.0
15	10.4	9.0	12.4	12.8	11.5	11.4	8.2	12.0	8.9	8.6	12.0	10.0
16	9.2	11.0	12.6	12.8	13.0	11.0	5.4	12.0	10.0	8.0	8.1	10.4
17	9.0	9.0	13.0	12.8	7.0	13.8	10.0	13.0	8.8	10.6	6.0	10.8
18	9.0	8.4	13.0	9.4	8.0	12.6	10.4	13.0	8.6	6.3	7.0	12.8
19	6.0	9.4	11.6	10.4	9.5	15.0	10.2	13.0	8.2	9.0	7.6	14.6
20	8.1	9.4	11.6	8.8	8.0	14.8	10.2		5.2	6.0	8.4	9.2
21	9.0	9.4	11.6	9.8	7.0	15.0	10.0	9.2	6.0	7.3	12.6	7.2
22	7.9	6.0	11.4	6.0	8.0	10.2		8.8	7.0	11.4		
23	12.6	6.0	7.2	5.4	8.4	15.4	10.2	10.2	9.2	7.6	9.6	12.8
24	11.2	10.4	12.0	7.4	10.0	12.0	6.9	7.0	8.0	8.0	11.4	
25		9.4	10.2	10.6	8.6	10.4	8.6	5.8	7.2	9.8	8.0	9.0
26	11.2	11.2	8.0	11.4	7.0	10.2	9.4	9.4	9.2	9.0	7.0	10.2
27	12.0	6.2	8.6	11.4	7.0	10.0	8.8	9.0	9.6	6.4	6.0	9.8
28	6.1	10.4	7.8	11.2	7.4	10.0	9.6	6.2	7.8	8.5	12.4	6.0
29	11.0	10.6	7.6	7.6	7.2	10.0		8.0	7.2	6.8	9.2	8.2
30	11.0	10.0	10.0	8.0	9.0	10.1	11.0	8.0	6.4	7.4	8.4	6.4
31	11.2		11.4		11.0		10.0	10.4				9.6
MEDIA	4.7 3	4.9 3	5.3 3	5.3 3	5.1 3	5.0 3	4.5 3	4.8 3	4.2	4.6	4.7	4.9
MAXIMA ABSOLUTA	13.6 3	12.0	13.0	13.8	13.0	15.4 3	11.0 3	13.6 3	11.4	11.2 3	12.6	14.6 3
MINIMA ABSOLUTA	-1.8 3		*	-1.0					0 3	0	1.0	0
MEDIA DE MINIMOS	-6 3	1.2 8	1.2 8	1.9	2.2 8	1.7 8	1.2 8	1.3 8	1.2 3	1.6	2.1	1.5
MEDIA DE MAXIMOS	10.3 3	9.6	10.3	10.1	9.2	11.3 3	9.2 3	10.3 3	7.9	8.2 3	8.5	9.4 3
** DATOS PRELIMINARES **												
MEDIA												
MAXIMA ABSOLUTA												
MINIMA ABSOLUTA												
MEDIA DE MINIMOS												
MEDIA DE MAXIMOS												
3												
8												
EST. OTROS METODOS												

Anexo 3. Valores medios diarios de temperatura en la estación Las Brisas, IDEAM (2015).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES												
SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL												
VALORES MEDIOS DIARIOS DE TEMPERATURA (°C)												
ANO 2003												
ESTACION : 26155150 BRISAS LAS												
FECHA-INSTALACION 1981-OCT												
FECHA-SUSPENSIÓN												

DIA	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE

01	4.9	4.3	4.5	4.5	4.7	4.6	4.3	3.7	5.0	3.5	4.5	
02	5.1	3.8	5.3	6.1	5.5	5.3	5.7	4.3	4.8	3.9	5.0	
03	4.0	3.8	5.5	6.0	4.9	4.2	4.8	3.8	5.2	5.6	4.1	3.5
04		5.3	4.6	5.4	4.5	6.3	4.6	5.4	5.4	5.8	4.6	4.6
05	3.6	4.0	4.1	5.8	5.4	4.3	5.3	4.6	4.7	5.1	5.9	5.1
06	4.0	5.0	3.7	5.0	5.9	4.9	5.0	4.8	3.9	4.7	4.7	
07	4.7	5.3	5.0	5.4	5.5	5.3	4.5	4.3	4.6	4.3	4.0	3.9
08	5.7	3.9	3.7	5.2	4.8	5.6	4.5	4.5	4.0	4.1	4.5	
09	5.2	4.5	5.7	5.2	4.2	4.5	4.0	4.7	4.6	4.4	5.3	5.3
10	5.1	4.8	3.3	5.3	3.8	5.6	5.2	3.6	4.6		6.0	
11		4.9	5.3	6.0	5.3	4.3	4.9	3.6	4.3	5.2	5.0	
12	6.4	5.6	5.9	4.8	4.4	4.9	4.4	4.3	4.9		5.3	
13	5.1	5.2	4.4	5.8	4.4	5.8	4.6	5.0	4.9	5.1	4.9	4.0
14	6.1	5.1	4.4	5.1	5.1	6.4	4.4	4.3	5.5	4.6	5.0	3.3
15	4.5	6.5	3.0	4.2	6.2	4.8	5.3	4.2	5.3	4.9	3.5	
16	5.1	5.4	8.8	4.5	6.6				4.3		5.8	
17	5.6	5.1	4.8		6.6	4.5	4.9		4.8	5.8	4.0	
18	5.6	4.9	4.1		6.1	4.4	4.1	4.4	4.3	6.6	4.3	4.5
19	3.5	5.1	3.3		5.9		5.4	4.0	4.9	4.9	5.0	4.4
20	5.7	6.6	3.4	5.7	5.2		6.7	4.2	4.6	5.5	4.1	4.9
21		6.0	4.2	3.8	5.1		6.9	4.4	4.7	4.2	5.2	6.1
22	4.9	6.3	4.6	4.4	5.6		5.8	3.8	4.0	3.7	4.3	4.6
23	3.3	5.6	4.2	5.1		4.9	5.2		3.1	6.6	5.5	4.9
24	4.3	4.6	4.9	4.4	6.7	5.0	5.4		4.1	5.3	4.0	5.3
25	3.6	5.4	3.6	4.2	6.6	4.3		4.9	4.4	5.3	4.5	5.6
26	3.8	4.0	5.0	4.9	3.3	3.3		5.1	5.2	4.8	5.3	
27	4.1	5.2	3.8	4.2	3.9	4.2		4.3	5.3	4.2	4.9	3.9
28	5.3	4.8	4.7	5.1	4.7	4.2		4.7	5.2	3.9	5.0	4.6
29	4.3			3.3	5.1	3.9		4.1		4.1		5.7
30	4.8		4.1	4.8	4.7	4.5			4.2	4.1		
31	4.4		3.8				4.3		4.2			
MEDIA	4.8 3	5.0	4.4 3	4.9 3	5.3 3	4.8 3	5.1 3	4.4 3	4.6 3	4.8 3	4.6 3	4.7 3
MAXIMA ABSOLUTA	13.0 3	15.4 3	11.8 3	11.0 3	12.0 3	10.8 3	12.9 3	11.0 3	11.8 3	12.0 3	10.0 3	12.4
MINIMA ABSOLUTA	-1.5	-0.6 3	-1.6	4	1.0	-0.3	-1.2 3	-1.0	.0	.8 3	.0 3	-3.2 3
MEDIA DE MINIMOS	-4	1.5 3	1.1	2.0	2.5	1.5	1.3	1.2	1.4	2.0 3	2.7 3	.3
MEDIA DE MAXIMOS	9.9 3	9.3 3	9.2 3	8.9 3	9.4 3	8.2 3	10.4 3	9.1 3	8.7 3	8.8 3	8.4 3	9.0
** DATOS PRELIMINARES **												
*** VALORES ANUALES ***												
MEDIA 4.8												
MAXIMA ABSOLUTA 15.4												
MINIMA ABSOLUTA -3.2												
MEDIA DE MINIMOS 1.5												
3 : INCOMPLETOS												

Anexo 4. Valores mínimos diarios de temperatura en la estación Las Brisas, IDEAM (2015).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES													
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL													
VALORES MINIMOS DIARIOS DE TEMPERATURA (°C)													
ANO 1982													
FECHA DE PROCESO : 2015/03/09		TIPO EST	CP	DEPTO			CALDAS	ESTACION : 26155150 BRISAS LAS					
LATITUD 0454 N		ENTIDAD	01	IDEAM	MUNICIPIO			VILLAMARIA	FECHA-INSTALACION 1981-OCT				
LONGITUD 7521 W		REGIONAL	09	VALLE-QUINDI	CORRIENTE			MOLINOS	FECHA-SUSPENSIÓN				
ELEVACION 4150 m.s.n.m		*****											
DIA	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	

01	1.2		2.2	.0		-1.4		.0	3.0	2.0	2.8	1.8	
02	1.2		2.4	2.8		1.2		1.0	1.2	.2	2.0	1.0	
03	1.6		1.6			2.1		.8	1.0	1.0	1.0	.8	
04	1.6	1.2	1.4	.4		1.6		-0.6	2.0	.4	.6	2.4	
05	1.0	.0	.4	3.0		1.0		.2	1.0	1.0	2.8	1.8	
06	.0	-5.0	1.2	3.2		2.3		.2	1.6	-0.4	1.4	3.0	
07	1.0	2.6	1.0	1.8		2.0		-5.0	.0	-2.4	2.0	3.0	
08	.0	1.6	.8	2.4		2.0		2.0	.8	1.8	.8	2.0	
09	.0	1.6	.0	2.8		1.3		.0	1.2	1.0	1.0	2.0	
10	.0	3.2	.0	1.8		2.4		1.0	1.0	.4	1.4	1.5	
11	1.2	3.0	1.0	3.2		1.0		.6	2.6		1.4	4.0	
12	1.0	2.2	1.0	1.0		1.3		.2	1.0	2.0	2.4	4.0	
13	.0	2.4	1.8			1.8		-0.4	1.0	3.0	2.0	2.0	
14	1.0	1.0	1.8	1.0		1.2		1.0	-3.0	1.0	1.6	2.0	
15	1.0	2.4	.0	1.0		.2		.0	1.0		2.0	2.0	
16	.4	2.0	2.0	2.2		.0		1.8	2.4	1.0	-1.4	1.8	
17	.0	1.0	1.4			2.0		.0	1.8	1.0	2.0	2.0	
18	.0	1.2	1.6	1.8		1.8		.6	1.8	1.0	2.2	2.2	
19	.0	1.0	2.2	1.4		2.0		1.6	.8	2.0	3.0	4.0	
20	1.2	2.0	2.0	2.0		2.0		1.0	1.0	2.0	2.4	2.4	
21	.0	2.0	1.0	2.8		.8		1.0	1.0	2.0	3.0	2.0	
22	-1.0	1.4	1.6	.2		.8		-3.0	.0	1.0	2.4	1.8	
23	.0	1.0	3.0	2.0		1.4		.8	.6	1.6	1.0	2.0	
24	.0	3.2	3.2	1.0		.6		1.4	1.6	2.0	.6	1.8	
25	.0	-3.0	2.6	1.0		.2		1.4	1.6	2.4	1.0	1.0	
26	-7.0	4.0	2.0			1.6		-0.4	1.2	2.0	.6	1.0	
27	-7.0	1.4	3.2	2.0		.0		2.0	2.2	1.8	.6	3.0	
28	-8.0	1.4	1.6	2.0		1.3		1.0	1.8	1.4	1.2	.6	
29	-7.0	1.8	1.6			.0		2.0	1.0	1.8	1.4		
30	1.4		2.2	2.1		1.2		2.0	1.0	1.4	1.0		
31	1.0		2.4				2.0		1.0			5.0	
MEDIA	3.7	4.2 3	4.5	4.7	4.5 3	4.3	3.7	4.0 3	3.8	4.0	3.9	4.5	
MAXIMA ABSOLUTA	11.0 3	10.0 3	11.0	11.0 3	9.8 3	11.4 3	11.8	11.2	10.0	8.8 3	9.2 3	9.4 3	
MINIMA ABSOLUTA	-8.0 3	-5.0 3	.0	.0 3	1.0	-1.4	-3.0	-5.0	-3.0	-2.4 3	-1.4 3	.6 3	
MEDIA DE MINIMOS	-0.5 3	1.4 3	1.6	1.8	2.3	1.2	.7	.5	1.2	1.3 3	1.5 3	2.2 3	
MEDIA DE MAXIMOS	7.5 3	7.5 3	7.8	7.4 3	7.2 3	8.2 3	7.6	8.6	7.2	6.0 3	7.3 3	7.2 3	
*** VALORES ANUALES ***													
MEDIA 4.2													
MAXIMA ABSOLUTA 11.8													
MINIMA ABSOLUTA -8.0													
MEDIA DE MINIMOS 1.3													
MEDIA DE MAXIMOS 7.5													
3 : INCOMPLETOS													