



Análisis de la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciaria en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría Caldas, Colombia).

Estudio científico como base para la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana

Katherine Peña Maldonado

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales
Maestría En Gestión Ambiental
Bogotá D.C 2016



Análisis de la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciár en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría Caldas, Colombia).

Estudio científico como base para la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana

Katherine Peña Maldonado

Trabajo de grado presentado para optar por el título de
Magister en Gestión Ambiental

Director:

PhD. Enrique Morán Tejada

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales

Maestría En Gestión Ambiental

Bogotá D.C 2016

Nota de aceptación

Firma Jurado

Firma Director

Nota de advertencia: Artículo 23 de la Resolución No. 13 de julio 1946.

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

“Nunca midas la altura de una montaña hasta que no hayas llegado a la cumbre. Entonces verás que no era tan alta como pensabas.”

John Lubbock

Agradecimientos

A mi familia por apoyarme, aconsejarme y darme la pauta para realizarme a nivel personal, laboral y profesional.

A mi director Enrique Morán Tejeda por el aporte sustancial de conocimientos y experiencia, así como su compromiso y apoyo constante durante la consolidación y desarrollo del presente trabajo.

Al profesor Armando Sarmiento por sus valiosas contribuciones conceptuales que enriquecieron el presente documento.

A todos los docentes y compañeros de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales de la Pontificia Universidad Javeriana, por secundar en mi formación y potenciar en mí, valiosas habilidades, capacidades y actitudes.

A Lina Zuluaga por confiar en mí y por su apoyo constante

A Jorge Luis Ceballos y Yina Nocua por abrirme las puertas al mundo de la glaciología, la alta montaña y compartir esta pasión.

A la Pontificia Universidad Javeriana por brindarme excelentes espacios y docentes de calidad que permitieron dar continuidad a mi proceso de formación.

Al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, fuente de gran parte de la información utilizada en esta investigación.

Resumen

El actual “cambio climático” caracterizado principalmente por un aumento de las temperaturas globales, está mermando la capacidad de las montañas para retener agua en forma sólida, propiciando un ambiente más seco, que eventualmente causaría una aceleración en los procesos de descomposición de materia orgánica, afectado los flujos de carbono y por ende la estructura y porosidad de los suelos de páramo y bosque altoandino. Son pocas las investigaciones orientadas a esclarecer los impactos que estos cambios acarrearían sobre los sistemas sociales y naturales, dado que la calidad y cobertura de la información climática en estas zonas, impide la generación de análisis robustos. En este contexto, la presente investigación, analizó la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciar en una cuenca piloto (cuenca alta del río Claro) instrumentalizada por el IDEAM desde el año 2006, como un insumo para la formulación de propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana. Se concluye que la gestión al cambio climático, debe abordarse de forma integral, dado que, en la dinámica propia del espacio geográfico, los procesos físicos, sociales y naturales y sus relaciones e interacciones son complejos y estocásticos. por lo que sería incorrecto generalizar su análisis y sus formas de manejo. De igual forma, en el estudio de la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña se debe tener en cuenta la escala espacio temporal de análisis, ya que los impactos derivados de la relación sociedad naturaleza pueden originarse y reflejarse a nivel local, regional o global y a largo, mediano y corto plazo.

Palabras clave: Adaptación, alta montaña, cambio climático, cuenca, mitigación

Abstract

The current "climate change" characterized by an increase in global temperatures, is undermining the ability of the mountains to retain water in solid form, leading to a drier environment, which eventually cause an acceleration in the processes of decomposition of organic matter, affecting carbon fluxes and hence the altoandino forest and moorland soil structure and porosity. Few researches are aimed at clarifying the impacts these changes would bring on the social and natural systems, due to the quality and coverage of climate information in these areas, which prevents the generation of robust analysis. In this context, this research analyzed the hydroclimate variability and glacier dynamics in a pilot basin

(upper basin Claro river) instrumentalized by IDEAM since 2006, as an input for formulating proposals for adaptation and mitigation to climate change in the Colombia mountains. In summary climate change management must be addressed in a comprehensive manner due to the relationships and interactions between the physical, social and natural processes within the geographical space dynamics are complex and stochastic, hence, it would be wrong to generalize its analysis and management forms. Similarly, the study of adaptation and mitigation of climate change in the high mountains should take into account the spatiotemporal scale analysis, since the impacts derived from society-nature relationship can arise and be reflected at the local, regional or global level, and in a long, medium and short term.

Keywords: Adaptation, high mountains, climate change, basin, mitigation

Tabla de Contenido

Resumen	6
Índice de Figuras	10
Abreviaturas	14
1. Introducción	17
2. Marco Teórico	19
2.1. Marco Conceptual	19
2.1.1. <i>Cambio climático y variabilidad climática</i>	19
2.1.2. <i>Característica e importancia de la alta montaña</i>	21
2.1.3. <i>Ciclo Hidrológico: eje fundamental de los ecosistemas y el bienestar humano</i>	23
2.1.4. <i>Gestión ambiental: una aproximación desde la cuenca para hacer frente al cambio climático.</i>	24
2.2. Marco de referencia	25
2.2.1. <i>Iniciativas, protocolos y políticas implementados a nivel internacional, nacional y local para la gestión del cambio climático</i>	25
2.2.2. <i>Gestión ambiental de la alta montaña</i>	29
3. Antecedentes	31
3.1. Evidencias del cambio climático	32
3.2. Impactos del cambio climático en los ecosistemas de alta montaña	36
3.3. Cambio climático y ciclo del agua en la alta montaña.....	38
3.4. Propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña ...	39
4. Planteamiento del Problema	42
5. Justificación	44
6. Objetivos	45
6.1. Objetivo general	45
6.2. Objetivos específicos	45
7. Metodología	46
7.1. Área de estudio	47

7.2.	Revisión y análisis de documentos y normatividad relacionados con aspectos socioeconómicos y gestión al cambio climático en la cuenca alta del río claro	55
7.2.1.	<i>Aspectos relacionados con la gestión al cambio climático</i>	55
7.2.2.	<i>Aspectos relacionados con la gestión al cambio climático</i>	55
7.3.	Caracterización de la dinámica glaciar y la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Claro.....	56
7.3.1.	<i>Dinámica glaciar y su relación con el clima</i>	56
7.3.2.	<i>Análisis de la variabilidad hidroclimática de la cuenca alta del río Claro</i> ...57	
7.4.	Recomendaciones para la generación adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana.....	64
8.	Resultados y Análisis	65
8.1.	Gestión al cambio climático y la alta montaña cuenca alta del río Claro	65
8.2.	Aspectos socioeconómicos cuenca alta de Río Claro	68
8.3.	Caracterización de la dinámica glaciar y la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Claro.....	75
8.3.1.	<i>Dinámica glaciar y su relación con el clima</i>	75
8.3.2.	<i>Análisis de la variabilidad hidroclimática</i>	87
8.3.3.	<i>Análisis hidroclimático de las subcuencas de estudio (Glaciar, Páramo y Bosque Altoandino)</i>	100
8.4.	Recomendaciones para adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana	123
9.	Conclusiones	130
10.	Recomendaciones	132
11.	Bibliografía	133

Índice de Figuras

Figura 1. Regiones de la Temperatura Superficial del Océano Pacífico. Tomado de (NOAA, 2015).....	20
Figura 2. Subdivisión altitudinal de la fisionomía de la vegetación. Tomado de (Cleef, 1981)	22
Figura 3. Partes de un glaciar. Tomado de (Antarctic Glaciers, 2015)	23
Figura 4. Ciclo Hidrológico. Tomado de (USGS, 2015).....	23
Figura 5. Esquema del desarrollo metodológico. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 6 Mapa de la localización de la cuenca alta de Río Claro. Modificado de: (Prieto, 2008).....	48
Figura 7. Límite entre piso glaciar y Periglaciar. Fotografías tomadas por: Nocua, 2015 ..	51
Figura 8. Vegetación característica del piso Periglaciar. Fotografías tomadas por: Peña, 2016	51
Figura 9. Ecosistema Páramo cuenca de Río Claro. Fotografías tomadas por: Peña, 2015	52
Figura 10. Perfil del suelo del ecosistema Páramo. Fotografía tomada por: Morán, 2015 .	53
Figura 11. Ecosistema Bosque Altoandino cuenca de Río Claro. Fotografías tomadas por: Peña, 2015	54
Figura 12. Red hídrica e Instrumentalización situada en la cuenca alta del río Claro. Fuente: Elaboración propia. Fotografías tomadas por: Peña, 2015	58
Figura 13. Coberturas y usos del suelo de la cuenca alta de Río Claro. Fuente: Modificado de (Prieto, 2008)	71
Figura 14. Evolución glaciar volcán Nevado Santa Isabel. Elaboración de los autores Fuente de los datos: IDEAM, 2014.	77
Figura 15. Balance de masa anual glaciar Conejeras volcán nevado Santa Isabel. El gráfico ilustra la mediana (línea), el rango intercuartílico (caja), la media (cruz), y los percentiles 10 y 90 (bigotes) de las distribuciones de frecuencias del balance de masa de cada año. Fuente: elaboración de los autores Fuente de los datos: IDEAM 2016.....	80
Figura 16. Espesor de nieve volcán nevado santa Isabel. Fuente: IDEAM, 2016	81
Figura 17. Análisis espectral de las series de datos del balance de masa, el ENSO, precipitación y temperatura.	82

Figura 18. Evolución de las variables independientes (temperatura, ONI y Precipitación) y el balance de masa	83
Figura 19 Reconstrucción balance de masa glaciar conejeras volcán nevado Santa Isabel, periodo de 2006-2016.....	85
Figura 20. Reconstrucción del balance de masa del glaciar Conejeras volcán nevado Santa Isabel, periodo de 1982-2016. Los valores ausentes durante los años 1988 y 1992-93, se deben lagunas de datos en las variables independientes precipitación y temperatura.....	85
Figura 21. Series de datos temperatura media estación San Antonio fuente: Elaboración propia.....	88
Figura 22. Series de datos de temperatura máxima (color rojo) media (color azul) y mínima (color verde) de las estaciones ubicadas en la cuenca medial alta de río Claro. Periodo: enero de 2009 a mayo de 2016. Fuente: Elaboración de los autores.....	90
Figura 23. Relación de la temperatura y precipitación con los fenómenos climáticos extremos “El Niño” y “La Niña”. El gráfico ilustra la mediana (línea) el rango intercuartílico (caja), los percentiles 10 y 90 (bigotes) y los valores extremos (puntos) de las distribuciones de frecuencias de la precipitación y temperatura durante los fenómenos climáticos ENSO. Fuente: elaboración de los autores.....	91
Figura 24. Variabilidad y tendencia de las temperaturas durante la temporada seca y húmeda. Estación Brisas. Fuente: Elaboración de los autores.	92
Figura 25. Series de datos de precipitación acumulada mensual de las estaciones ubicadas en la cuenca medial alta de río Claro. Periodo: enero de 2009 a mayo de 2016. Fuente: Elaboración de los autores.....	97
Figura 26. Variabilidad y tendencia de las temperaturas durante la temporada seca y húmeda. Estación Brisas. Fuente: Elaboración de los autores.	98
Figura 27. Coberturas de la tierra cuenca del río Claro. Fuente: IDEAM, 2010. Elaboración: de los autores	103
Figura 28. Series de datos sin procesar estaciones hidrológicas cuenca del rio Claro.....	105
Figura 29. Series de datos de aportes fluviales cuenca del rio Claro. Fuente: Elaboración de los autores.....	106
Figura 30. Caudales y Temperaturas Horarias Estación Conejeras. Fuente: Elaboración de los autores.....	107

Figura 31. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación Sietecuerales	108
Figura 32. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación San Antonio.	109
Figura 33. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación Río Claro Fuente: Elaboración de los autores	109
Figura 34. Balance hídrico de las subcuencas ubicadas en la cuenca del río Claro. Elaboración de los autores	111
Figura 35. Caudal y rendimiento hídrico subcuencas de estudio. Elaboración de los autores.	112

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de las series de datos de la cuenca alta del río Claro	59
Tabla 2. Usos del suelo en cuenca alta del río Claro	71
Tabla 3. Evolución del área glaciár, volcán nevado Santa Isabel periodo de 1850-2014 ...	76
Tabla 4. Retroceso del frente glaciár periodo de 1988-2016.....	78
Tabla 5. Datos Balance de masa anual del glaciár Conejeras volcán nevado Santa Isabel 2006-2016.....	79
Tabla 6. Evolución de las variables independientes (temperatura, precipitación y ONI) y el balance de masa.....	84
Tabla 7. Resumen test de Mann-Kendall para las temperaturas. Periodo 1982-2015	92
Tabla 8. Resumen test de Mann-Kendall para las precipitaciones acumuladas. Periodo 1982-2015	98
Tabla 9. Coberturas de la tierra cuenca del río Claro	103
Tabla 10. Resumen comportamiento hídrico subcuencas de estudio	112

Abreviaturas

ASOCARS	Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible
CANCILLERIA	Cancillería Ministerio de relaciones Exteriores
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CH₂	Metano
CHEC SA ESP	Central Hidroeléctrica de Caldas
CI	Conservación Internacional Fundación
CMNUCC	la Comisión Marco de las Naciones Unidas para el cambio climático
CO₂	Dióxido de carbono
CONPES	El Consejo Nacional de Política Económica y Social Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio
COP	Climático
Corpocaldas	Corporación Autónoma Regional de Caldas
CPC	Climatic Prediction Center
DCC	Dirección de Cambio Climático
DNP	Departamento Nacional de Planeación
ECDBC	Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono
ELA	Equilibrium Line of Glacier Reducción de las Emisiones por la Deforestación y la Degradación
ENREDD+	de Bosques
ENSO	Niño/ Oscilación del sur
EPFD	Estrategia de Protección Financiera ante Desastres
ESC	Escorrentía
ETR	Evapotranspiración Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la
FAO	Agricultura
FESCOL	Friedrich-Ebert-Stiftung en Colombia
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
FNA	Fondo Nacional del Ambiente

	Grupo Consultivo sobre Investigaciones Agronómicas Internacionales
GCAI	Internacionales
GEF	Fondo Mundial para el Medio Ambiente
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Agustín Codazzi
INAP	Proyecto Integrado de Adaptación Nacional
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MA	Ministerio del Ambiente
MADS	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
MEI	Multivariate ENSO índice
MRI	Mountain Research Initiative
N₂O	óxido nitroso
NAMAs	Nationally Appropriate Mitigation Action
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCC	Nodos Regionales de Cambio Climático
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONG	Organización de Gubernamental
ONI	Índice Oceánico Niño
P	Precipitación
PAI	Plan de acción inmediato
PBOT	Plan Básico de Ordenamiento Territorial
PEM	Planes Estratégicos en las Áreas Hidrográficas o Macrocuencas
	Plan de trabajo sobre montañas del Programa Internacional Geosfera Biosfera
PIGB	Biosfera
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PNN	Parque Nacional Natural Los nevados
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de Naciones Unidas por el Medio Ambiente
POMCA	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas

PRAA	Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales Sistema de Identificación y Clasificación de Potenciales
SISBEN	Beneficiarios para Programas Sociales
SISCLIMA	Sistema Nacional de Cambio Climático
SOI	Southern Oscillation Index Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales
UAESPNN	Naturales
UICN	Unión Internacional para la Unión de la Naturaleza
UMATA	Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y
UNESCO	la Cultura
UNGRD	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

1. Introducción

Las zonas de montaña, gobernadas por enormes gradientes energéticos en cortas distancias espaciales, representan los sistemas de mayor sensibilidad y vulnerabilidad en el contexto de cambio climático y cambio en los usos del suelo que vive la superficie del planeta durante las últimas décadas (IPCC, 2013) y (Beniston M. , 2003). Además, debido a sus características biofísicas se constituyen en auténticas reservas de recursos hídricos (Viviroli, Weingartner, & Messerli, 2003), almacenando el agua en forma de hielo, nieve, lagos, agua subterránea o agua edáfica. Las montañas por lo tanto abastecen agua a las regiones llanas y de piedemonte, donde generalmente se sitúan los núcleos de población y actividades humanas más importantes, además se constituyen en excepcionales reservorios de biodiversidad nativa y endémica (FAO, 2002).

En Colombia, estos importantes sistemas están compuestos por tres ecosistemas diferenciados que se suceden en el gradiente altitudinal. El bosque Altoandino, que encuentra fuertemente intervenido por el hombre que, mediante continuos procesos de deforestaciones ha aprovechado los recursos forestales de forma intensiva y ha abierto enormes espacios para obtener pastos para el desarrollo de actividades ganaderas; el páramo es un ecosistema de montaña único en el mundo se caracteriza por la presencia de un manto vegetal arbustivo, con numerosas especies, algunas de ellas endémicas, sobre suelos y paleosuelos de enorme desarrollo, de hasta 3 metros de profundidad. El páramo se encuentra bajo la constante amenaza de los incendios, provocados por campesinos para generar sistemas silvopastoriles, y potenciados en periodos de sequía relacionados con el fenómeno climático “El Niño”. Por último, el glaciar se encuentra está sometido a un continuo retroceso asociado al calentamiento global. Conjuntamente las poblaciones que habitan esta zona, son catalogadas como las más vulnerables a los posibles cambios que se sucederán frente a esta gran problemática ambiental, dado su baja su baja calidad de vida y disponibilidad presupuestal, que dificultan la implementación de mediadas de adaptación y mitigación. En la actualidad, la agenda política a nivel nacional no ha incluido iniciativas de gestión a esta importante problemática ambiental. A la fecha sólo se han implementado dos proyectos a nivel nacional dirigidos a proponer medidas de adaptación y mitigación en este importante sistema.

Gracias a una red de monitoreo hidroclimático instalada durante el año 2008 en la cuenca del río Claro en el municipio de Villamaría Caldas y las continuas mediciones del balance de masa glaciaria en el Nevado de Santa Isabel desde 2006, ambas realizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), se han podido obtener series climáticas e hidrológicas de los ecosistemas (bosque Altoandino, páramo, y glaciaria), en un gradiente altitudinal desde los 2700 hasta los 4800 m altitud. Este experimento se constituye en una iniciativa única en el mundo, y presenta un enorme potencial científico, dado que brinda información real sobre los aspectos climáticos e hidrológicos de cada uno de los ecosistemas de la alta montaña, permitiendo comprender como estos podrían responder a los procesos de cambio global.

En el contexto de dicho experimento hidroclimático, se plantea la presente investigación, que tiene como objetivo principal analizar la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciaria en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría Caldas, Colombia), como un insumo para la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana. El desarrollo metodológico se orientó bajo la metodología diseñada por AndesPlus, (2012) que se detallará más adelante. Se realizó un análisis de la línea base de la zona de estudio donde se incluyeron aspectos relacionados con la gestión ambiental en la cuenca, además de los aspectos socioeconómicos y biofísicos. Posteriormente y a partir de los resultados obtenidos se establecieron recomendaciones básicas a tener en cuenta en la generación de propuestas de adaptación y mitigación en la alta montaña colombiana.

El presente documento se encuentra dividido en varias secciones. Inicialmente se realiza una caracterización del marco conceptual del trabajo, en donde se desarrollan los conocimientos más relevantes de la investigación, Posteriormente se presenta el marco de referencia en donde se realiza una síntesis de como se ha abordado la gestión del cambio climático y la alta montaña a diferentes escalas; reconociendo las convenciones, instrumentos, protocolos y políticas que han aportado en el desarrollo de la misma. Conjuntamente, se exhibe una revisión de las principales investigaciones desarrolladas en el tema de estudio. Seguidamente, se presenta el planteamiento del problema, justificación, objetivos y metodología del trabajo y finalmente se revelan y discuten los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos planteados, las conclusiones y recomendaciones.

2. Marco Teórico

El presente apartado, contiene un marco conceptual en donde se desarrollan los conocimientos más relevantes de la investigación. Posteriormente se presenta el marco de referencia en donde se realiza una síntesis de como se ha abordado la gestión del cambio climático a diferentes escalas, reconociendo las convenciones, instrumentos, protocolos y políticas que han aportado en el desarrollo de la misma. Esto, como fundamento para la construcción del marco conceptual y metodológico de la presente investigación.

2.1.Marco Conceptual

2.1.1. *Cambio climático y variabilidad climática*

Actualmente, el cambio climático es uno de los retos de mayor relevancia al que se enfrentan las sociedades humanas. Sin embargo, aún se conoce poco sobre su complejidad, ya que trasciende mucho más que cambios en la temperatura atmosférica como consecuencia del aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), producto de la actividad humana, particularmente del uso de combustibles fósiles. Los impactos que este fenómeno está causando y puede causar en los diferentes sistemas bióticos, abióticos, culturales, económicos, sociales y las interacciones que se suceden entre los mismos, se han venido estudiando con el objeto de adoptar medidas de mitigación y adaptación para reducir la vulnerabilidad de la población humana y los ecosistemas (Varela, 2009).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2013) y la Comisión Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) sustentan que el cambio climático corresponde a la variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las diferenciaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. Según la CMNUCC, las dos estrategias planteadas para hacer frente al cambio climático a nivel global son: la adaptación, la cual se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos reales, proyectados y a la evaluación de sus efectos, en busca de moderar el daño; y la mitigación que el (IPCC,

2013) la define como la intervención antropogénica para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero. En cuanto al concepto clima, se define como una descripción estadística y a largo plazo del tiempo atmosférico es decir del comportamiento de la temperatura y la precipitación diaria, en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante periodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años.

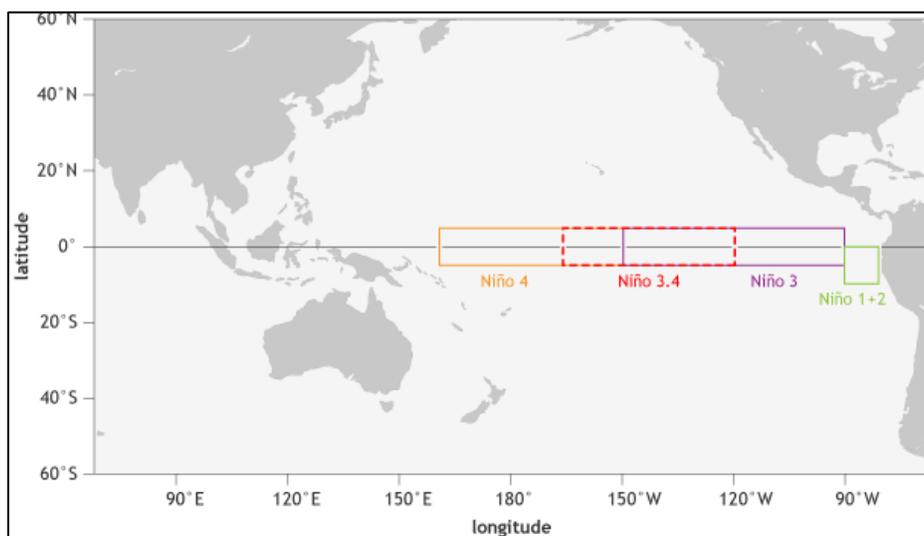


Figura 1. Regiones de la Temperatura Superficial del Océano Pacífico. Tomado de (NOAA, 2015)

Al conjunto de fluctuaciones del clima durante determinados periodos de tiempo se le denomina variabilidad climática (Montealagre, 2009). Esta puede deberse a los procesos internos naturales del sistema climático o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (IPCC, 2013). En Colombia el fenómeno meteorológico o climático de mayor relevancia es el Niño/ Oscilación del sur (ENSO por sus siglas en ingles) el cual tiene una fase fría denominada “La Niña” y una fase cálida denominada “El Niño”, ambas con un fuerte impacto en el clima regional y mundial, además de fases neutras con escaso impacto climático (CPC, 2012). Los fenómenos ENSO están asociados con el debilitamiento/fortalecimiento de los vientos alisios del este y con la Oscilación del Sur (la componente atmosférica del ENSO), correspondiente a una variación de las presiones atmosféricas entre el oeste y el este del pacífico ecuatorial Arango el atl (2012). Este fenómeno causa enormes perturbaciones en la circulación atmosférica y oceánica del planeta, afectando el “tiempo” (corto plazo) y el clima (mediano y largo plazo) (Poveda, y otros, 2012). Los fenómenos ENSO son multifacéticos e involucran diferentes aspectos de la

atmosfera y el Pacífico tropical, por lo que se han creado diferentes maneras de medirlos y monitorearlos. Existen tres regiones para su estudio (Niño 1+2, Niño 3 y Niño 4) (ver figura 1) y numerosos índices entre los que destacan el Índice Oceánico Niño (ONI por sus siglas en inglés), el Índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés) o el Índice de ENSO multivariante (MEI por sus siglas en inglés) (NOAA, 2015).

2.1.2. Característica e importancia de la alta montaña

Las zonas montañosas representan el 11% de la superficie terrestre y son consideradas como un elemento vital para el bienestar humano y el equilibrio ecológico dada su importancia en el ciclo hidrológico como reservorio y regulador y su alta diversidad biológica. Según la (FAO, 2002), las montañas proveen directamente de alimento al 10% de la humanidad, entre el 30 a 60% en las zonas húmedas y entre el 70 a 95% en ambientes áridos y semiáridos. En América Latina se reconoce a los Andes como la cadena montañosa más importante, caracterizados por sus picos empinados, variables condiciones climáticas, gran cantidad de endemismos y biodiversidad, y porque es allí en donde se originan los principales ríos del continente (Buytaert, et al., 2012, Cortés & Sarmiento, 2013, Ministerio del Ambiente, 2002 y Hofstede, 2002).

En Colombia se considera a la alta montaña como un espacio geográfico correspondiente a las culminaciones altitudinales de las cordilleras andinas a partir de los 2.700 msnm, cuyo modelado ha sido el resultado de procesos de origen glaciar y periglacial, junto con la acción volcánica en la cordillera central y el macizo colombiano (Sarmiento et al., 2013). Desde el punto de vista geomorfológico incluye de menor a mayor altitud, el modelado periglacial, el modelado glaciar heredado de la última glaciación, el piso periglacial y el piso glaciar o de los nevados actuales. La extensión de la alta montaña es de 41.255 km², equivalentes al 11.5% del área andina de Colombia (Flórez A. , 2003).

Cuatrecasas (1934, 1958, 1968), Rangel, (2000) y Cleef, (1981) propusieron la subdivisión altitudinal del sistema montañoso de Colombia de acuerdo a las características del suelo, clima, tipos de crecimiento de los elementos dominantes y relación de los acontecimientos ecológicos de las partes altas con las zonas inferiores (ver figura 2). Esta subdivisión contempla seis sistemas: el primero, el bosque altoandino, es considerado como una zona de ecotonía (transición) entre la vegetación cerrada de la media montaña y la abierta de la parte

alta. Presenta doseles de menor altura, mayor desarrollo de las epífitas, además de matorrales altos y bosques ralos (Van der Hammen et al.,2002). La importancia del bosque altoandino radica en el control de la erosión del suelo y la sedimentación. Además, juega un papel fundamental en la reducción de la salinidad, sedimentos y nutrientes y regulación de los niveles freáticos (Bishop & Landell-Mills, 2007); el subpáramo o páramo bajo, corresponde a la zona altitudinal de vegetación entre el límite altitudinal original del bosque andino continuo y el páramo propiamente dicho. Presenta originalmente un mosaico de vegetación de páramo abierto, formaciones arbustivas y bosque Altoandino (Van der Hammen et al.,2002) y (Rangel, 2000); Posteriormente encontramos el Páramo, que es un ecosistema natural y transformado de alta montaña, exclusivo del neotrópico. Según Pombo (1989), este ecosistema tiene gran importancia en el ciclo hidrológico dada su capacidad de controlar grandes volúmenes de agua y flujos a través de las cuencas hidrográficas; El superpáramo es la tercera franja, situada en un ambiente periglacial, anterior a los bordes de nieve y glaciares, y se identifica por la discontinuidad de la vegetación y la apreciable superficie de suelo desnudo. (Rangel, 2000 y Ministerio del Ambiente, 2002).

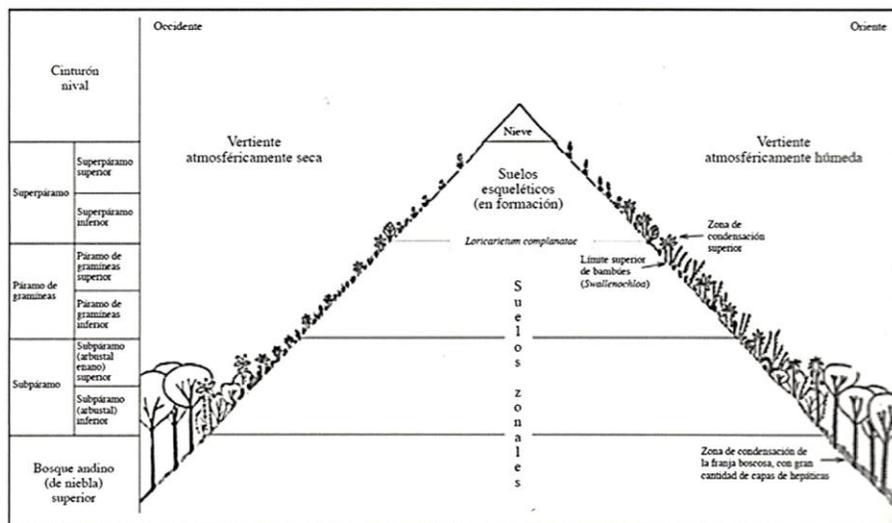


Figura 2. Subdivisión altitudinal de la fisonomía de la vegetación. Tomado de (Cleef, 1981)

Finalmente, el área glaciaria atañe a masas de hielo (nevados) en movimiento que incluyen detritos rocosos y se caracterizan por poseer en la mayoría de los casos una zona de acumulación, que es donde el glaciar gana masa y una zona de ablación, en donde el hielo pasa a estado líquido, aportando agua a los páramos y alimentando ríos. Estas dos componentes están divididas por una línea imaginaria denominada Línea de Equilibrio

(ELA) (ver figura 3); es allí donde las ganancias y pérdidas tienen el mismo valor. (IDEAM, 2012). Las áreas glaciares de Colombia, que en la actualidad representan el 0.17% de los glaciares del subcontinente americano se originaron durante los pulsos de enfriamiento glacial del Cuaternario (glaciaciones) (Strahler & Strahler, 1994).

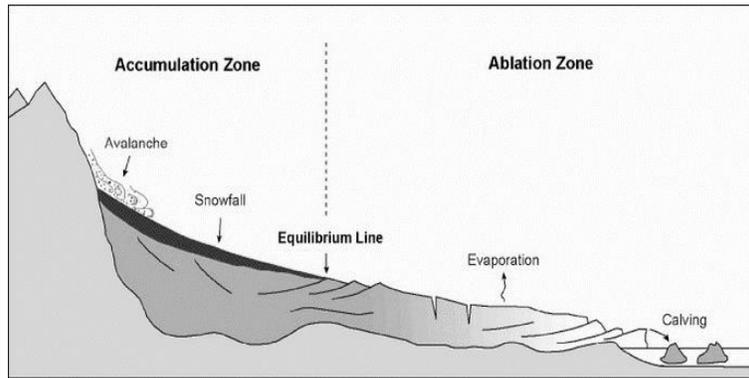


Figura 3. Partes de un glaciar. Tomado de (Antarctic Glaciers, 2015)

2.1.3. Ciclo Hidrológico: eje fundamental de los ecosistemas y el bienestar humano

Según Andrade & Navarrete (2004), el ciclo hidrológico se constituye en un sistema que posee entradas y salidas y es dinámico (figura 4). Las entradas se dan en forma líquida y sólida mediante la precipitación y las salidas a través del estado gaseoso con fenómenos tales como la evaporación y la evapotranspiración. Se considera dinámico dado que el agua permanece en continuo movimiento, mediante transformaciones denominadas cambios de estado (evaporación, condensación, solidificación, fusión y sublimación), desplazándose cíclicamente entre la atmosfera, tierra y mares. De esta manera, modela la superficie de la tierra gracias a los procesos hidromorfodinámicos y propicia que en todos los ecosistemas terrestres y acuáticos se den procesos biológicos productivos (Andrade & Navarrete, 2004).

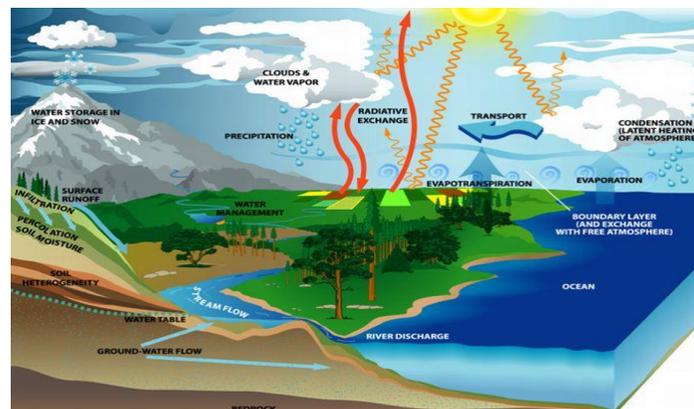


Figura 4. Ciclo Hidrológico. Tomado de (USGS, 2015)

El ciclo hidrológico inicia con la evaporación del agua. Este vapor asciende hasta cierta altura en donde se condensa para formar las nubes, las cuales darán lugar a las precipitaciones bajo sus diferentes formas (agua líquida, nieve, granizo). Durante la precipitación parte del agua vuelve a la atmosfera por evaporación de las gotas de lluvia. No obstante, la mayor parte llega hasta la superficie de la tierra donde toma diferentes caminos. Parte se evapora inmediatamente desde la superficie del suelo o desde las hojas y tallos de las plantas sobre las que ha caído, otra parte se infiltra penetrando en el suelo donde reaparecerá en forma de manantiales o constituirá las capas de agua subterránea que después serán empleadas por el hombre. Del agua precipitada que no se infiltra o evapora, se forman los cursos de agua superficiales, como riachuelos y ríos que van a desembocar en lagos, mares y océanos, desde donde inicia nuevamente el ciclo (Jiménez F. , 1994). Los elementos del ciclo hidrológico constituyen la base para los ecosistemas, las regiones naturales y el bienestar humano, considerándose como un elemento esencial para la vida, por lo cual, su análisis y estimación debe considerarse como un eje transversal en propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático. No obstante, en la actualidad, todavía subsisten incertidumbres importantes respecto a la tendencia de las variables hidrológicas, debido a las grandes diferencias regionales y a limitaciones en la cobertura espacial y temporal de las redes de monitoreo (Huntington, 2006).

2.1.4. Gestión ambiental: una aproximación desde la cuenca para hacer frente al cambio climático.

El cambio climático es un tema de gran relevancia en la actualidad y concierne a todos los seres humanos, debido al impacto que tiene y tendrá sobre nuestro sistema de vida actual. Nos encontramos lejos de comprender todo lo que abarca y sus alcances en un futuro próximo, no solo por la cantidad de componentes que involucra, sino por la complejidad del mismo, dadas las estrechas y numerosas interconexiones entre los numerosos componentes del sistema climático. En este sentido, la gestión ambiental cuyo surgimiento se remonta a los años 70 del siglo XX, se constituye en un marco conceptual óptimo para la comprensión y resolución de problemas ambientales, ya que nace bajo la premisa de realizar una reorientación del pensamiento ambiental (ecodesarrollo y desarrollo sostenible) y se define como un proceso que comprende un conjunto de funciones y actividades organizativas (panificar, investigar, ejecutar y controlar) tendientes a plantear soluciones a las

problemáticas ambientales de una manera sistémica e integral, desde una visión inter , trans y multidisciplinar (Muriel, 2006).

La gestión ambiental subyace como una herramienta que hace posible construir iniciativas integrales para la recuperación y resiliencia de los ecosistemas. Ferrando (2003) argumenta que dichas iniciativas tienen una mejor aplicación y resultados en unidades espaciales sistémicas naturales, que cuando se llevan a cabo por unidades administrativas, puesto que el seccionar los sistemas naturales desde una visión político económica puede no brindar una visión fehaciente del funcionamiento del sistema y por ende alterar o hacer fracasar los proyectos a implementar. En este sentido, las cuencas hidrológicas entendidas como un “sistema natural abierto”, es decir, como un sistema complejo donde confluyen el medio biofísico y la intervención antrópica, son las unidades espaciales para la gestión y planeación de un territorio por excelencia (Jiménez F. , 2006). Conjuntamente la CEPAL (2002) sustenta que es en las cuencas en donde se logra una mejor integración de los elementos que confluyen en la gestión de los territorios. El agua como eje articulador, y elemento de gestión, se ha planteado desde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, como elemento principal para dar respuesta a problemáticas ambientales y conflictos sociales (Salcido , 2010). La formulación de propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana a partir del análisis de una región específica, como en el caso de la cuenca alta del río Claro, otorga un punto estratégico para la gestión a nivel local, regional y nacional en torno a los usos del suelo, el ciclo hidrológico y las relaciones socioecológicas.

2.2.Marco de referencia

2.2.1. *Iniciativas, protocolos y políticas implementados a nivel internacional, nacional y local para la gestión del cambio climático*

Los procesos y fenómenos asociados a los eventos climáticos se han convertido en un desafío para las sociedades humanas, ya que han sobrepasado las disciplinas, sectores y condiciones político administrativas de las organizaciones, naciones y regiones; ello hace imprescindible la integración y voluntad tanto de las sociedades como de las ciencias en la generación de información, capacidades, estrategias y recursos en la búsqueda de una gestión óptima para hacer frente al cambio climático (IDEAM, 2010). En este sentido, el presente acápite,

desarrolla una síntesis en orden cronológico de cómo se ha abordado a nivel internacional y nacional, la gestión del cambio climático y de la alta montaña, reconociendo las convenciones, instrumentos, protocolos y políticas que han aportado en el desarrollo de la misma.

2.2.1.1. Contexto internacional

Las declaraciones, convenciones y protocolos internacionales, con mayor o menor apoyo de las naciones, han sido la base para implementar cambios en el desarrollo de las actividades humanas, las cuales son la principal responsable del cambio global que está sufriendo el planeta tierra, entendiendo el cambio global como el conjunto de cambios ambientales a nivel local o regional generados por actividades humanas, que suponen cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema tierra, afectándolo o mermando la capacidad para mantener la vida (Duarte, 2006). La primera mención sobre el medio ambiente en el ámbito internacional fue en 1972 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente humano. Uno de los resultados más sobresalientes de esta convención fue la creación del Programa de Naciones Unidas por el Medio Ambiente (PNUMA, PNUMA, 2015 y Naciones Unidas, 1972). Dos años más tarde, en el año 1979, se celebró la primera Conferencia Mundial sobre el Clima, en donde se presentaron las primeras evidencias de la influencia de las actividades antrópicas en el clima y se hizo un llamado a todos los gobiernos del mundo para prever y prevenir los cambios generados, garantizando el bienestar de la humanidad.

Durante la década de los 80 tomó fuerza la concienciación por las problemáticas medioambientales, y a finales de la misma en 1988 el PNUMA, junto con las Naciones Unidas y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) establecieron el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC), que tiene como misión proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta (IPCC, 2016). La Segunda Cumbre de la Tierra tuvo lugar en Río de Janeiro en el año 1992 y es considerada una de las cumbres de mayor importancia para la gestión del cambio climático, puesto que fue allí donde se plantearon iniciativas e instrumentos políticos para controlar las concentraciones de gases de efecto invernadero. Conjuntamente, se declaró

el umbral de concentración atmosférica de dichos gases, teniendo en cuenta una escala espacio-temporal que permitiera a los ecosistemas adaptarse naturalmente, asegurando que los sistemas productivos no se vieran afectados y generando de esta manera un desarrollo económico sostenible (CMNUCC, 2014). En dicha convención se abrieron a la firma a dos instrumentos con fuerza jurídica obligatoria para la gestión del cambio climático: el de políticas de cambio climático en Costa Rica, y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático (CMNUCC).

Otro logro trascendental en la historia de la gestión del cambio climático se dio la Tercera Conferencia de las Partes Sobre el Cambio Climático en 1997 en Kioto, Japón, donde se gestó el Protocolo de Kioto, considerado como de los instrumentos de mayor relevancia para la mitigación del cambio climático. Posteriormente, en el año 2006 se acoge el programa de trabajo de Nairobi cuyo objetivo se centraba en apoyar a los países miembros de la CMNUCC. En el 2007 se adoptó la “Hoja de ruta de Bali”, marcando el inicio de un proceso de negociación para un acuerdo global vinculante de reducción de emisiones de gases de efectos invernadero aplicable a todos los países contrarios al Protocolo de Kioto que sólo acogía los países industrializados (CMNUCC, 2008). En la COP XV los países miembros de la CMNUCC inician con la redacción de acuerdos no vinculantes de reducción de las emisiones y promesas de medidas de mitigación. Dichos acuerdos se formalizaron en Cancún un año más tarde (CMNUCC, 2014) y junto con el protocolo de Kioto y la “Hoja de ruta de Bali” se constituyeron en la base de las discusiones que tuvieron lugar en Durban en el año 2011, en donde se estableció extender el Protocolo de Kioto por un segundo periodo después del año 2012 y formalizar un acuerdo para desarrollar un nuevo instrumento legal que limitará las emisiones de gases de efecto invernadero en todas las naciones. También se creó el Fondo Verde para el Clima el cual aumentaría considerablemente el volumen de financiamiento multilateral que circula bajo el auspicio de la CMNUCC (PNUD, 2011). En París 2015 se logró establecer el Acuerdo de París el cual estará abierto a la firma en la ciudad de Nueva York desde el 22 de abril de 2016 hasta el 21 de abril de 2017 y empezará a regir a partir del año 2020. Este acuerdo solo será realmente vinculante para los estados en tanto exista la adhesión de por lo menos 55 países que produzcan el 55% de los gases de efecto invernadero (CMNUCC, 2015).

2.2.1.2. Contexto nacional

Colombia aprobó la CMNUCC mediante la expedición de la Ley 164 de 1994 y el Protocolo de Kioto mediante la Ley 629 del año 2000. Como parte de la convención, Colombia tiene el compromiso de presentar periódicamente “Comunicaciones Nacionales” que suministren información importante acerca de las emisiones de gases efecto invernadero (Contraloría General de la República, 2014). A la fecha Colombia ha presentado tres comunicaciones ante la CMNUCC: la primera, realizada en el año 2001, exhibe importantes análisis de la vulnerabilidad del país frente al cambio climático; la segunda y tercera presentadas en el año 2010 y 2015 respectivamente contienen escenarios de cambio climático. (Contraloría General de la República, 2014). Adicionalmente el Ministerio del Ambiente junto con el Departamento Nacional de Planeación, aunaron esfuerzos para elaborar el documento “Lineamientos de Política de Cambio Climático” el cual presenta una serie de estrategias con sus respectivas líneas de acción, para potencializar las oportunidades derivadas de los mecanismos financieros y cumplir con los compromisos establecidos ante la CMNUC (DNP, 2011).

En el año 2011 el gobierno nacional a través de la Ley 1450 expidió el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 (PND 2010-2014) estableciendo en el artículo 217 la formulación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) (DNP, 2011). Asimismo, el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), emitió la “Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia”, presentada en el documento “CONPES 3700 de 2011. Dicho instrumento estableció el marco institucional (SISCLIMA), el cual tiene como objetivo coordinar y articular las iniciativas y actores necesarios para abordar la problemática del cambio climático en Colombia, por medio de la puesta en marcha de iniciativas priorizadas por el Gobierno Nacional, tales como: la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), la Estrategia Nacional para la Reducción de las Emisiones por la Deforestación y la Degradación de Bosques (ENREDD+), la Estrategia de Protección Financiera ante Desastres y el PNACC (DNP, 2011). En marco de la implementación de las estrategias propuestas, y en aras de coordinar, convenir y garantizar la participación de instituciones y actores tanto públicos como privados de las instancias locales, regionales y nacionales, el MADS apoyó la conformación y consolidación de Nodos Regionales de Cambio Climático

(NRCC), como una medida de descentralización de las acciones nacionales, en la búsqueda del empoderamiento de los entes territoriales y de las poblaciones locales para fortalecer la gestión del cambio climático en Colombia (MADS, 2013 y MADS, 2016). A la fecha se han elaborado dos de los cuatro documentos estipulados para la consolidación del PNACC, el primero de ellos denominado ABC Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, marco conceptual y lineamientos, el cual provee información base para los sectores y territorios que deseen integrar la adaptación al cambio climático dentro de sus procesos de planificación (DNP, 2012). Por otra parte, el documento Hoja de Ruta para la Elaboración de los Planes de Adaptación dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático socializado con actores de diferentes sistemas productivos en el año 2013, tiene por objeto orientar a los actores, sectores productivos y territorios en la elaboración de acciones de adaptación al cambio climático (Contraloría General de la República, 2014 y DNP, 2013).

El PND 2014-2018 además asentó en el artículo 145 que el Fondo Adaptación, creado mediante Decreto Ley 4819 de 2010, podrá estructurar y ejecutar proyectos integrales de reducción del riesgo y adaptación al cambio climático. Adicionalmente, mediante el artículo 156 estableció que los Ministerios de Agricultura y Desarrollo Rural, Minas y Energía, Transporte, Salud y Protección Social, Vivienda, Ciudad y Territorio y Comercio, Industria y Turismo, formularán e implementarán planes sectoriales de adaptación al cambio climático y planes de acción sectorial de mitigación de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (DNP, 2015). Finalmente, en el marco del convenio 398 de 2015 celebrado por la Dirección del Cambio Climático del MADS y la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS), se elaboraron tres documentos (Hoja de Ruta PEM, Hoja de Ruta POMCA y Lineamientos) para la incorporación del cambio climático en los Planes Estratégicos en las Áreas Hidrográficas o Macrocuencas (PEM) y en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. (MADS & ASOCARS, 2015)

2.2.2. Gestión ambiental de la alta montaña

Las montañas son mundialmente importantes dado que ofrecen una base de sustento directo de la vida para casi un décimo de la humanidad, así como también proveen bienes y servicios a más de la mitad de la población. Sin embargo, son consideradas como ambientes muy frágiles a las condiciones climáticas y actividades antrópicas, debido a que el crecimiento

vegetal y formación del suelo en ambientes fríos se genera de manera paulatina, es decir que ante un desastre natural o intervención antrópica en un ecosistema de alta montaña podría ser irreversible y en caso de ser reversible su recuperación sería en un largo periodo de tiempo (FAO, 2002). En este sentido, la institucionalidad ha venido implementando estrategias de gestión que conlleven a mitigar los impactos que las sociedades humanas han adelantado en estos ecosistemas estratégicos. A continuación, se presenta un contexto internacional y nacional sobre la gestión en la alta montaña.

2.2.2.1. Contexto internacional

El primer planeamiento sobre la importancia de las montañas se presentó en 1992 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente humano realizada en Río de Janeiro. Allí se logró incluir la estrategia de la ordenación de los ecosistemas frágiles y desarrollo sostenible de las zonas de montaña en el capítulo 13 (CMNUCC, 1992). Posteriormente en el año 1993 la Comisión Interorganismos sobre el Desarrollo Sostenible adscrita a Naciones Unidas, designó a la FAO como coordinador sectorial de dicha iniciativa. (FAO, 2002). En 1995 el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) seleccionó el tema de los ecosistemas de montaña como uno de los diez programas operacionales y designó a la Unión Internacional para la Unión de la Naturaleza (UICN) para llevar a cabo su seguimiento y ejecución. Este programa ha sido muy exitoso ya que, a través del Programa Integrado de Conservación Ambiental y Desarrollo Sustentable en la Región Andina, ha desarrollado proyectos fundamentados en el desarrollo sostenible en zonas de bosques nubosos y húmedos de las montañas neotropicales en Latinoamérica (FAO, 2002). Conjuntamente, iniciativas como el Plan de trabajo sobre montañas del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (PIGB), han estudiado los impactos de los cambios mundiales sobre la hidrología y la ecología de las montañas desde una visión sistémica para proponer instrumentos de planificación ante el cambio climático, las concepciones de desarrollo e interacciones de procesos hidrológicos y ecológicos en función de la altitud. La Iniciativa Mundial para la Montaña del Grupo Consultivo sobre Investigaciones Agronómicas Internacionales (GCI AI), tiene por objeto mejorar la gestión de los recursos naturales de los que dependen los suministros de alimentos, agua potable, energía, minerales y productos forestales. (Price, 2003). En años posteriores la CNUMAD ha encaminado iniciativas, programas y proyectos a nivel internacional para difundir y concientizar a las

sociedades humanas sobre la importancia de los recursos y servicios presentes en la montaña tales como los recursos de agua dulce, la diversidad biológica, la importancia de las actividades recreativas y la sensibilidad a los cambios de clima. No obstante, se sigue enfrentando al gran desafío de proponer estrategias eficaces para la conservación y manejo de estos importantes ecosistemas (FAO, 2002).

2.2.2.2. Contexto nacional

En Colombia la gestión de la alta montaña se ha enfocado específicamente en el ecosistema de páramo por medio de su delimitación en un espacio geográfico, en aras de implementar mecanismos legales para su protección y funcionamiento atendiendo a la importancia de estos ecosistemas en la sociedad. Con la Ley 99 de 1993 se establecen los principios ambientales generales que deben guiar la gestión ambiental en el territorio colombiano. Entre ellos están la zona de páramos y subpáramos. Por otra parte, la Ley 812 de 2003 Art.89 reglamentó que las zonas de páramo, bosques de niebla y áreas de influencia de nacimientos acuíferos deberán ser protegidos con carácter prioritario por las entidades territoriales y entidades administrativas de la jurisdicción correspondiente. Lo cual se complementó con el Decreto 2372 de 2010 Art 29, en donde se dispone a los páramos, subpáramos o zonas de recarga acuífera como ecosistemas estratégicos, por lo que las entidades ambientales deben adelantar acciones tendientes a su conservación y manejo. La Ley 1450 de 2011 por la cual se expide el PND 2010-2014 define que los páramos deberán ser delimitados escala 1:25.000 con base en estudios técnicos, sociales, económicos y ambientales los cuales deben ser adelantados por autoridades ambientales (Sarmiento et al., 2013).

3. Antecedentes

Con el fin de vislumbrar los aportes que realizará la presente investigación al conocimiento generado en la actualidad, el presente apartado contiene una revisión cronológica de las investigaciones desarrolladas para estudiar los cambios, variabilidad y escenarios futuros del clima; impactos del cambio climático en los ecosistemas y el ciclo hidrológico de la alta montaña y programas y proyecto de adaptación y mitigación al cambio climático diseñados e implementados a nivel nacional y regional.

3.1.Evidencias del cambio climático

El cambio climático se ha convertido en uno de los temas de mayor relevancia para la comunidad científica a nivel mundial. Wallace Broecker fue uno de los primeros científicos en plantear que en las próximas décadas el planeta tierra podría experimentar las temperaturas globales más cálidas de los últimos 1000 años a consecuencia del CO₂ liberado en la atmosfera; aludiendo a que la respuesta de la temperatura global no es lineal al contenido de CO₂ en la atmosfera y que, si este último aumentará en un 10%, probablemente las temperaturas se elevarían 0.32°C (Broecker, 1975). El IPCC en su primer informe de evaluación realizado en el año 1990, señaló que la temperatura del aire en la superficie había aumentado entre 0.3 y 0.6 °C, y el nivel del mar entre 10 a 20 cm durante los últimos 100 años, haciendo alusión a que dicho fenómeno podría deberse a la variabilidad climática natural, así como al aumento de los GEI producto de las actividades antrópicas. Además, se estimó que la temperatura media mundial aumentaría en promedio 0.3°C cada diez años partiendo del supuesto de que los gases de efecto invernadero continuaran con su incremento. Esto daría como resultado un aumento de la temperatura para el año 2025 de 1°C y de 20 cm en el nivel del mar para el año 2030. Dicho aumento tendría una distribución desigual, siendo menor en las zonas tropicales y mayor en las regiones polares (IPCC, 1990). El primer informe publicado por el IPCC no hacia explícito que el aumento de los GEI fueran una consecuencia de las actividades antrópicas. No obstante, en el segundo informe publicado en el año 1995, se argumenta que las concentraciones atmosféricas del dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) han aumentado en 30%, 145% y 15% respectivamente, como consecuencia en gran parte, a las actividades humanas, sobre todo debido al uso de combustibles fósiles y al cambio en el ordenamiento de las tierras y a la agricultura (IPCC, 1995).

El tercer informe del IPCC, (2001), indicó que la temperatura mundial de la superficie se ha incrementado entre 0.4 a 0.8 °C por decenio (1901-2000) durante el siglo XX, dicho valor aumentó 0.15°C con respecto al último informe, puesto que se mejoró el tratamiento de los datos y acrecentaron las temperaturas durante el periodo de 1995-2000. Esto cambió en el cuarto informe que señaló que la temperatura superficial había incrementado como promedio en todo el planeta entre 0.56°C y 0.92°C por decenio desde 1901 a 2005 siendo más acentuado en las altitudes septentrionales superiores, en donde, se estima que las

temperaturas durante la segunda mitad del siglo XX fueron superiores a las de cualquier otro periodo de 50 años en los últimos 500 años y las más altas a lo largo de los últimos 1300 años. Las regiones terrestres han tenido un proceso de calentamiento más rápido que los océanos, los cuales han aumentado su nivel entre 1.3 y 2.3 mm/año desde 1961 al 2005 y 3.1mm/año desde 1993 a 2005 (Roger et al. 2000, IPCC 2007) Entre 1990 y mediados de 1995, la fase de calentamiento constante del fenómeno ENSO fue excepcional respecto a la experimentada en los últimos 120 años (IPCC, 1995). Asimismo, el año 1998 se consideró como el año más cálido desde 1961, dado el fenómeno climático extremo “El Niño” que se presentó durante este año (IPCC, 2001). Esto concuerda con los planteado por Jaimes (1998) y Viles & Goudie (2002), quienes sustentan que "El Niño 1997-98" mostró una evolución rápida y de gran intensidad, reconociéndose como uno de los más fuertes ocurridos sobre el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental en los últimos 150 años. En el año 2013, el IPCC publicó su quinto informe, (2013), donde se asegura que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado. Los datos de la temperatura media global en superficie muestran una tasa de calentamiento de 0.85 (0.65 a 1.06°C) por decenio entre 1880 a 2012. En cuanto al océano se argumenta que su calentamiento es mayor cerca de la superficie, en donde se ha calentado 0.11 (0.09 a 0.13) °C por decenio durante el periodo de 1971 a 2010 con un incremento en su nivel de 0.19m (0.17 a 0.21) desde mediados del siglo XIX (IPCC, 2013). Cabe resaltar que estos promedios históricos podrían aumentar en posibles escenarios, dado que el año 2015 ha sido el año más cálido desde que existen registros, y el 2016 está en camino de batir el record.

Los cambios en la precipitación también han sido reportados. Según el (IPCC, 2001, 2007) las precipitaciones en los países tropicales pueden haber aumentado de 0.2 a 0.3% por década. Lo cual concuerda con Jones & Hulme (1996) y Hulme et al. (1998), quienes argumentan que la precipitación a nivel mundial se ha incrementado alrededor de 2% desde el comienzo del siglo 20. A su vez Karl & Knight (1998), complementan este planteamiento indicando que este aumento no ha sido espacio-temporalmente uniforme. Cabe señalar que en su cuarto informe el (IPCC, 2013) sustenta que las precipitaciones se han intensificado desde 1902 en las zonas continentales de latitudes medias. Sin embargo, en las otras latitudes existe un nivel

de incertidumbre significativo hacia tendencias positivas o negativas por lo cual no es posible concluir sobre la dinámica y predicciones con respecto a la precipitación (IPCC, 2013).

Respecto al territorio que nos ocupa, Mekis & Hogg (1999), observaron en registros de precipitaciones anuales de los Andes de Sudamérica, tendencias negativas al oeste y positivas al este. Distintas investigaciones han evaluado la variabilidad climática en América Latina encontrando que desde las décadas de 1960 y 1970 las temperaturas mínimas han presentado incrementos (Quintana, 1997). Conjuntamente Marengo et al (2011) argumentan que las temperaturas medias anuales de los países septentrionales aumentaron alrededor de 0.8 °C durante el siglo XX. Vuille & Bradley (2000) sostienen que existe una tendencia positiva de la temperatura del aire de 0.11°C por década desde 1939 a 1998, valor que se triplicó en los últimos 25 años del siglo XX, posiblemente por la influencia del fenómeno climático “El Niño”.

En Colombia, investigaciones encaminadas a estudiar el cambio climático como el publicado por Pérez et al (1998) indican una clara tendencia de calentamiento no homogéneo en el territorio colombiano, presentando un incremento en mayores altitudes en series de temperatura mínima y media, atribuido principalmente a procesos deforestación y urbanización (Pabón . , 2003). Dicho aumento corresponde al orden 0.1 a 0.2°C por decenio (Pabón, 2012) es decir, que en los últimos 50 años la temperatura promedio del territorio colombiano habría experimentado un aumento estimado de 0.65°C (Posada, 2007). Por su parte el IDEAM en la segunda comunicación al CMNUCC, analizó el comportamiento de la lluvia y temperatura con series de datos históricas, encontrando fuertes incrementos en las temperaturas máximas en las zonas de páramo con valores cercanos a 1°C por década mientras en el subpáramo y bosque altoandino, los incrementos fueron de 0.3°C y 0.6°C por década. Los escenarios generados indicaron que la temperatura aumentaría 1.4°C para el periodo de 2011-2040, 2.4°C para el lapso de 2041-2070 y 3.2°C para el periodo comprendido entre los años 2071 a 2100 (IDEAM, 2010). Por otra parte, Pabón (2012), sugiere que a finales de siglo XXI el calentamiento sobre el territorio colombiano sería paulatino con incrementos de la temperatura media del aire de 2-3°C entre 2011 y 2040 y de 3 a 4°C hacia 2071 a 2100, siendo el calentamiento más marcado en los valles del Magdalena y del Cauca. El IDEAM en su última estimación de escenarios argumenta que la temperatura

media anual en Colombia podría aumentar gradualmente para el fin del Siglo XXI (año 2100) en 2.14°C. Los mayores aumentos de temperatura para el periodo 2071 – 2100, se esperan en los departamentos de Arauca, Vichada, Vaupés y Norte de Santander (+2,6°C) (IDEAM et al, 2015).

Por otra parte, las precipitaciones y caudales han venido presentando cambios diferenciados por regiones con una leve tendencia a la disminución en la región Caribe, Pacífico y en el sur de la región Andina e incrementándose en el trapecio Amazónico y la Orinoquia (Pabón , 2003). Los páramos exhibieron tendencias a la disminución de eventos extremos de lluvia contrario a los demás pisos térmicos que ilustraron tendencias positivas. Los escenarios realizados por el IDEAM en la segunda comunicación para el CMNUCC mostraron que el 78% del territorio nacional para el primer periodo (2011-2040) tendría una variación entre más o menos 10%, lo cual se puede considerar dentro del rango normal de variabilidad. Adicionalmente, se puede destacar que la mayor reducción de la precipitación (-30 a -10%) se presentaría en un 20% del país para el periodo 2011-2040 (IDEAM, 2010). Según Pabón (2012), las precipitaciones presentarían reducción en la parte interandina y región Caribe y aumentos en la región Pacífica, en los piedemontes orientales y en un sector sobre el sur de Bolívar, Sucre y Magdalena Medio. Escenarios realizados por el IDEAM para la tercera comunicación ante la CMNUCC, revelan que para el periodo 2071 – 2100 se espera que la precipitación media disminuya entre 10 a 30% en cerca del 27% del territorio nacional (Amazonas, Vaupés, sur del Caquetá, San Andrés y Providencia, Bolívar, Magdalena, Sucre y norte del Cesar). De otro lado, para el mismo periodo se espera que la precipitación aumente entre 10 a 30% en cerca del 14% del territorio nacional (Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá) (IDEAM, et al, 2015)

Ruiz et al (2012) realizaron un estudio en la cuenca alta del río Claro, ubicada en la alta montaña colombiana analizando los cambios en la media, varianza y tendencias significativas de series de datos hidrometeorológicas encontrando un aumento en las temperaturas diurnas máximas, medias y mínimas de 0.6, 0.7 y 0.5 °C en una década respectivamente; la humedad atmosférica mostró reducciones de alrededor de 1.8, 3.9 y 6.6% / década. El número total de días de sol al mes aumentó en casi 2, días. No se observaron cambios significativos en las

precipitaciones, pero evidenciaron una mayor ocurrencia de eventos de lluvias inusualmente fuertes. Las reducciones en la cantidad de todos los tipos de nubes sobre la zona llegaron a 1.9% / década.

3.2. Impactos del cambio climático en los ecosistemas de alta montaña

Numerosas investigaciones han analizado los impactos que el cambio climático tiene sobre los ecosistemas de la alta montaña. El IPCC en su primera comunicación ante la CMNUCC, señaló que los ecosistemas se verían impactados por la variabilidad climática dependiendo de la rapidez con que esta se presente, existiendo la posibilidad de que adopten nuevas estructuras (evolucione) a consecuencia de las alteraciones experimentadas en cuanto a distribución, riqueza y abundancia de especies (IPCC, 1990; McCarty, 2001). Así mismo, se prevé que la vegetación se desplace a mayor altura y algunas especies con gamas climáticas limitadas a las cumbres montañosas se extinguirán debido a la desaparición de su hábitat (MA et al., 2001; Seimon et al., 2007; Cuesta et al., 2012). La erosión y los deslizamientos de tierra aumentarán en las laderas más empinadas de los bosques de niebla, y las epifitas y biotas características de este ecosistema se verán impactadas por la disminución de la humedad. El páramo y superpáramo podrían reducirse o fragmentarse y, con el calentamiento de sus bordes más bajos se convertirían en terrenos más adecuados para la agricultura, quedando expuestos a incendios antropogénicos (Herzog, et al, 2010). Se estima que para el año 2050 habrá desaparecido el 80% del área glaciaria del país y el 60% del área de páramos estará altamente degradada, afectando a la oferta hídrica de importantes ciudades a nivel nacional. Por el momento no es posible establecer la magnitud de esta afectación, puesto que no existen modelos del ciclo del agua para alta montaña que consideren adecuadamente el aporte del páramo, el bosque y el área glaciaria (Posada, 2007).

Los ecosistemas acuáticos también serán impactados; se predice una disminución de oxígeno disuelto y el aumento de la eutrofización y evaporación en los lagos y humedales, se generará la reducción de hábitat y cambios en la calidad de agua. Los humedales, en particular los bofedales junto a los márgenes de los ríos y manantiales experimentarán una menor disponibilidad de agua, aumento de la salinización, y emisiones de carbono como CO₂ y CH₄ (Herzog, et al., 2010). Pounds et al (1999) argumentan que el cambio climático propiciará una disminución drástica en el número de anuros (ranas y sapos) y lagartijas, y el aumento

de la colonización de especies de aves forestales. Según proyecciones, en los próximos 100 años la tercera parte de la masa glaciar montañosa desaparecerá dadas las pérdidas de extensión generalizadas de los glaciares y las reducciones del permafrost y la capa de nieve de los últimos decenios, los cuales se acelerarían durante el siglo XXI (IPCC, 1990,1996, 2001, 2007, 2013). A escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo desempeñan un papel crucial con respecto a la disponibilidad de agua dulce, por lo cual, el cambio climático podría afectar la esorrentía, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico, y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras (por ejemplo, Hindu-Kush, Himalaya, Andes), donde vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial (IPCC, 2013; Adam et al., 2009)

Los glaciares de Colombia en promedio retroceden de 2 a 3 km por año (Poveda & Pineda, 2009). Estudios realizados por Van der Hammen (1985) señalan que los glaciares en Colombia alcanzaron su máxima extensión hace 35.000 años cubriendo las montañas a partir de los 3000 msnm con un área de 17.109 km². Por otra parte, Flórez (2002) sustenta que para los años 1600 y 1850 Colombia tenía aproximadamente 374 km² de área glaciar, con elevaciones mínimas entre 4200-4400 msnm en los andes centrales y 4600 msnm en la Sierra Nevada de Santa Marta. Ocho glaciares desaparecieron en Colombia durante el siglo XX, y muchos otros perdieron la extensión de su área en un porcentaje de 60% a 80%. Actualmente tan sólo seis montañas en Colombia permanecen glaciadas: Sierra Nevada de Santa Marta (5775 msnm), Sierra Nevada del Cocuy (5490 msnm), Volcán Nevado del Ruiz (5400 msnm), Volcán Nevado de Santa Isabel (5110 msnm), Volcán Nevado del Tolima (5280 msnm), y Volcán Nevado del Huila (5655 msnm). Un estudio realizado por Poveda & Pineda (2009) indica que la Sierra Nevada de Santa Marta perdió un 41% de su superficie de hielo durante 1989 a 2007, la Sierra Nevada El Cocuy un 41%, el volcán nevado El Ruiz un 38%, el volcán nevado Santa Isabel 49%, el volcán nevado El Tolima un 24% y el volcán nevado El Huila un 56%. En total para el año 2007 Colombia contaba con 45km², con una tasa de retroceso glaciar del 3% anual; la causa más probable de dicho retroceso se atribuye al aumento de la media las temperaturas mínimas y medias, la disminución de la precipitación en forma de nieve y la actividad volcánica reciente.

3.3.Cambio climático y ciclo del agua en la alta montaña

En Colombia se han realizado estudios de los efectos potenciales del calentamiento global en el régimen hidrológico y aunque la evidencia respecto a las series de caudales no presenta datos contundentes sobre su comportamiento frente al cambio climático, se ha observado una tendencia hacia la disminución (Pérez et al., 1998; IDEAM, 2010). En un estudio realizado por Ruiz et al. (2011), en la cuenca alta del río Claro, se encontró una disminución de las caudales superficiales provenientes de zonas de alta montaña e importantes repercusiones en el balance hidrológico atribuidos al cambio climático y al estrés climático al que está sometido el ecosistema de páramo. En el mismo estudio, registros históricos medios y máximos anuales de las cuencas hidrográficas de los ríos Otún y Chinchiná demostraron tendencias decrecientes, aunque no significativas estadísticamente. Los registros de caudales mínimos en los meses más secos del año mostraron tendencias decrecientes y estadísticamente significativas (Ruiz et al., 2012).

Distintos ejercicios de modelización han evidenciado que la escorrentía es sensible a los cambios estacionales en las precipitaciones y los procesos de deshielo glaciar, presentando cambios importantes en su cantidad durante fenómenos climáticos extremos (Barry & Seimon, 2000; Buytaert et al., 2006; Cuesta et al., 2012), siendo las cuencas en zonas de montañas particularmente vulnerables ya que el calentamiento atmosférico puede ser más fuerte en altitudes elevadas que en las zonas más bajas (Thompson et al., 2000). Conjuntamente, las propiedades hidráulicas del suelo podrían ser afectadas significativamente a consecuencia de la presencia de estaciones secas pronunciadas que invocarían a la aceleración en los procesos de descomposición de la materia orgánica y por ende el desarrollo de la hidrofobia de los suelos, aumentando el riesgo de erosión del suelo, en particular cuando se combina con la eliminación de la vegetación, por ejemplo, para fines agrícolas. De esta manera, entendiendo la estrecha relación entre el contenido de carbono orgánico, la porosidad del suelo y la retención de agua, dichos procesos podrían afectar gravemente a la capacidad de regulación de agua de los suelos de páramo. Además, la descomposición de la materia orgánica del suelo en la región de páramo puede ser una fuente importante de CO₂ en la atmósfera (Buytaert et al., 2006).

De forma adicional al cambio climático, las actividades antrópicas en la alta montaña han venido aumentando drásticamente. A medida que las poblaciones han crecido y se ha desarrollado sus economías, los países han alterado deliberadamente los sistemas fluviales para aprovecharse de los recursos hídricos. La tala de bosques para ocupación humana y aprovechamiento forestal, la ganadería y agricultura intensiva, así como la captación de agua y generación de embalses ha tomado fuerza desde el siglo pasado, generando fuertes impactos sobre el ciclo hidrológico de la alta montaña, dado los cambios de la cobertura vegetal que inciden en la evapotranspiración, la interceptación de la lluvia y la infiltración (Crockford & Richardson 2000) ocasionando a su vez cambios en las propiedades del suelo como disminución en la capacidad de absorción, disminución en la evaporación, aumento en las escorrentía, erosión y movimiento de sedimentos (Buyart et al., 2006; Harden, 2006).

3.4. Propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña

Desde hace una década la comunidad académica a nivel nacional e internacional ha venido desarrollando investigaciones y proyectos enfocados a definir e implementar medidas de adaptación y mitigación para resolver anticipadamente los efectos negativos que acarrea el cambio climático. No obstante, a la fecha sólo se han implementado dos proyectos a nivel nacional dirigidos a proponer medidas de adaptación y mitigación en la alta montaña. El primer proyecto en implementarse a nivel nacional fue el Proyecto Integrado de Adaptación Nacional (INAP) en el año 2006, el cual fue desarrollado en marco de un acuerdo firmado entre la Agencia Presidencial para la Acción Social, Cooperación Internacional, Conservación Internacional Colombia y el Banco Mundial. Los recursos provenían del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) y la Republica de Colombia (IDEAM, 2011). El objetivo del proyecto fue apoyar a Colombia en la definición e implementación de medidas de adaptación y opciones de política para prever anticipadamente los impactos del cambio climático en la alta montaña, áreas insulares del caribe colombiano y la salud humana (IDEAM, 2011). Entre los resultados más relevantes se encuentran el desarrollo y publicación de la segunda comunicación para la CMNUCC elaborada por el IDEAM en el año 2010, en donde se realizaron escenarios de cambio climático a nivel nacional y se generó información sobre clima y variabilidad climática para la toma de decisiones; además de ello, se instrumentalizó cada uno de los ecosistemas presentes en la cuenca del río Claro en Villamaría Caldas y Calostros situada en Chingaza (glaciar, periglaciar, páramo, bosque

altoandino) en favor a fortalecer las redes de datos de cambio climático en la alta montaña para realizar modelos hidrológicos que permitieran comprender el comportamiento de cada uno de los ecosistemas. Se dio inicio a la restauración de áreas de producción como zonas estratégicas de regulación hídrica y se llevó a cabo la promoción de sistemas agroforestales, con el fin de construir resiliencia y reducir la vulnerabilidad de los sistemas productivos de altura a los impactos del cambio climático. Dicho trabajo se abordó bajo el enfoque de la participación comunitaria y se complementó con una caracterización de los sistemas productivos, su representatividad y su relación e influencia con las áreas de bosque altoandino y páramo en la cuenca. Estas iniciativas fueron igualmente incluidas en los instrumentos de planificación de uso de la tierra de los municipios que tenían jurisdicción en la cuenca (IDEAM, 2011).

Posteriormente, en el año 2008 se planteó el Programa Conjunto- Integración de Ecosistemas y Adaptación al Cambio Climático en el Macizo Colombiano, el cual tuvo como objetivo promover el manejo integrado de los ecosistemas para garantizar la provisión de bienes y servicios ambientales, incorporando consideraciones de cambio climático. Este trabajo se realizó desde el enfoque metodológico de la Investigación-Acción-Participación, reconociendo a las comunidades campesinas e indígenas que habitaban en el área de estudio como sujetos de derecho y conocimiento. Entre los principales resultados se encuentra la identificación y priorización de medidas de adaptación, generación de acciones al manejo de los sistemas de acceso, almacenamiento de agua para consumo humano y producción; capacitaciones en administración, gestión, uso y ahorro de agua; parcelas de seguridad alimentaria, y diversificación de los sistemas de producción implementación de una red de custodios de semillas y parcelas de aclimatación (IDEAM, 2011). Finalmente, en el año 2012 se consolidó una alianza entre diferentes entes gubernamentales y no gubernamentales a nivel nacional e internacional para la creación de un fondo canalizado al Banco Mundial que buscaba el desarrollo e implementación del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA). Este proyecto surge en razón a la necesidad de los países andinos de diseñar propuestas de adaptación que aporten al fortalecimiento de los ecosistemas locales y las economías afectadas por el acelerado retroceso de los glaciares tropicales que se han venido presentando en las últimas décadas. Sus objetivos principales fueron establecer una metodología para la formulación de líneas de

base científica en la determinación de medidas de adaptación en ecosistemas de alta montaña y promover el intercambio de conocimientos y el fortalecimiento de capacidades a las entidades técnicas y científicas de los países miembros de la Comunidad Andina involucrados en el PRAA. Uno de los mayores aportes de este proyecto fue la consolidación de una metodología para la formulación de las líneas base y medidas de adaptación al cambio climático en ecosistemas de alta montaña, a partir de un análisis sistémico integral que comprendía ejes temáticos a nivel biofísico, social, económico, político e institucional. (AndesPlus, 2012).

4. Planteamiento del Problema

Las montañas son importantes contenedores y moduladores de los recursos hídricos al almacenar agua en estado sólido, como manto de nieve y hielo glaciar, y en estado líquido en forma de lagos y en los poros y cavidades de sus rocas (Viviroli & Weingartner, 2004). Los diversos rasgos climáticos, geomorfológicos, edáficos y de cobertura vegetal presentes a lo largo de sus rangos altitudinales, dan origen a una gama de microclimas que se convierten en hábitats colonizados por especies que se adaptan a ellos y conforman nichos específicos, propiciando gran cantidad de endemismos y biodiversidad. Según la (FAO, 2002), las montañas proveen directamente de alimento al 10% de la humanidad, entre el 30 a 60% en las zonas húmedas y entre el 70 a 95% en ambientes áridos y semiáridos. A nivel mundial, se estima que aproximadamente el 40% de la población global vive en las cuencas de los ríos que nacen en las diferentes regiones montañosas del planeta (Beniston, 2003). Esto las hace imprescindibles para las sociedades humanas y el equilibrio ecológico dada su oferta hídrica excepcional, gran diversidad y valor paisajístico y cultural (Sarmiento, Cadena, Sarmiento, Zapata, & León, 2013).

El quinto informe del IPCC, asegura que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco “la atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado”. Los datos de la temperatura media global en superficie muestran una tasa de calentamiento de 0.85 (0.65 a 1.06°C) por decenio entre 1880 a 2012 (IPCC, 2013). Uno de los sistemas montañosos más amenazados por el cambio climático, a juzgar por el súbito retroceso de sus glaciares, son los Andes tropicales y ecuatoriales (Poveda et al., 2009; IPCC, 2013), los cuales, por su localización latitudinal presentan temperaturas mucho más altas y mayor número de horas de luz al año que las montañas situadas en latitudes medias, por lo cual los procesos de retroceso glaciar son más acentuados que en montañas de otras latitudes. En el ámbito colombiano y según estudios adelantados durante los últimos años por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el actual “cambio climático”, caracterizado principalmente por un aumento de las temperaturas globales, está mermando la capacidad de las montañas para retener agua en forma sólida, dando lugar a un manto de nieve cada vez menos duradero (Adam et al. 2009). De continuar esta situación, se podría intuir un intenso impacto tanto en

los ecosistemas asociados, como en las comunidades humanas que habitan las áreas de alta montaña alrededor de los glaciares, principalmente en términos de subsistencia. Además de la posible extinción de los glaciares, dos ecosistemas de la montaña Alto andina están siendo amenazados por procesos asociados al cambio climático y los cambios en la cobertura vegetal derivados de la fuerte intervención del territorio por parte del ser humano: el páramo y el bosque Alto Andino. El primero presenta una gran importancia en el funcionamiento hidrológico, al retener gran parte del agua lluvia en sus suelos profundos (Buytaert, et al., 2006). Sin embargo, en los últimos años los incendios asociados a periodos de sequía, están poniendo en peligro la supervivencia de especies, y la propia capacidad de retención hidrológica del ecosistema (Cuesta et al., 2014), El bosque Alto Andino es objeto de talas masivas para el aprovechamiento maderero y la instauración de sistemas ganaderos de ladera, cuyas consecuencias ecológicas e hidrológicas aún están por comprenderse dado que no se cuentan con estudios que analicen el aporte hídrico de cada uno de los ecosistemas de la alta montaña.

Cabe señalar, que las comunidades de la alta montaña se resaltan como una de las poblaciones más vulnerables al cambio climático, dado su alto grado de dependencia a los servicios y recursos ecosistémicos naturales, precaria y en algunos casos inexistente infraestructura de servicios sociales y públicos y su baja disponibilidad de recursos financieros para hacer frente a los costos que implica la adaptación y mitigación al cambio climático (DCC, 2015). Para el caso específico de la cuenca alta de río Claro se denotó que, pese a que la población posee baja vulnerabilidad asociada a la oferta hídrica, las comunidades que se encuentran asentadas en su inmediatez, cuentan con mínimas condiciones de calidad de vida, convirtiendo a la cuenca en un espacio “olvidado” y “marginal”, a pesar de su gran riqueza en términos de servicios ecosistémicos (Prieto, 2008). Conjuntamente, la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña, no se ha incluido dentro de la agenda política en ninguna escala (nacional, regional y local), por lo cual, existe una ausencia de iniciativas eficaces e integrales que conlleven a hacer frente a los retos que implican las condiciones climáticas que se avecinan en estos ecosistemas estratégicos y sus pobladores (Honty, 2007).

En este contexto, los investigadores del IDEAM, desde el año 2006 han intensificado las actividades tendientes a instrumentar glaciares y mantener una red de observación que

permite tener una serie de datos fiables para comprender mejor la relación clima-alta montaña (balance de masa glaciológico, cambios volumétricos, aportes hídricos líquidos, balances energéticos). Conjuntamente se han instrumentalizado los tres distintos ambientes de la montaña andina colombiana (zona periglaciaria, páramo y bosque altoandino) para entender los procesos que controlan la dinámica hidroclimática y su respuesta al cambio climático. En concreto, desde el año 2009, se cuenta con una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas distribuidas latitudinalmente en la cuenca alta del río Claro ubicada en el municipio de Villamaría en Caldas desde los glaciares situados a 4.950 m hasta los bosques Altoandino en torno a los 2700 m (Ceballos et al.,2006). No obstante, hasta la fecha no se han utilizado, desde una perspectiva analítica, las series de datos recogidas por esta red de monitoreo; por lo que no hay existencia de estudios tendientes a evaluar las características hidrometeorológicas de cada uno de los ecosistemas y su respuesta al cambio global.

5. Justificación

La información mencionada anteriormente, evidencia la necesidad de analizar los impactos que el cambio climático genera sobre cada uno de los ecosistemas de alta montaña colombiana (glaciar, periglaciaria, páramo y bosque alto andino) desde un enfoque sistémico integral, en aras resolver anticipadamente los efectos que acarrearía esta gran problemática ambiental sobre los sistemas naturales y las poblaciones humanas, garantizando su subsistencia a los condicionamientos que impone la naturaleza ante el cambio global. Para ello, se tomará como unidad de análisis la cuenca alta del río Claro ubicada en el municipio de Villamaría Caldas y el Parque Nacional Natural Los Nevados.

La selección de la cuenca se realizó, en razón a que allí se encuentra instalada una red de monitoreo climatológico y glaciológico del IDEAM, otorgando un punto estratégico para el análisis de la alta montaña colombiana, en torno a la dinámica climática, los usos del suelo, el ciclo hidrológico y su relación con el cambio climático. Se espera que los resultados obtenidos, sienten una base importante para comprender cómo los diferentes sistemas de la alta montaña (glaciar, páramo y bosque altoandino) pueden responder a los procesos de cambio global, en cuanto a su capacidad para retener y modular los recursos hídricos y con ello se constituyan en un referente científico para el diseño e implementación de propuestas

de adaptación y mitigación al cambio climático, que a su vez se constituyan en ejes transversales de los instrumentos de planificación territorial a nivel local, regional y nacional.

En este sentido se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Qué recomendaciones se deben adoptar para adaptación y mitigación al Cambio climático en la alta montaña colombiana a partir del análisis de la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciar en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría Caldas, Colombia)?*

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad hidroclimática y dinámica glaciar en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría Caldas, Colombia), como un insumo para de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana.

Para conseguir dicho objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

6.2. Objetivos específicos

1. Revisar y analizar documentos y normatividad relacionados con aspectos socioeconómicos y gestión al cambio climático en la cuenca alta del río claro, que contribuyan a la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña.
2. Caracterizar la variabilidad hidroclimática y la dinámica glaciar en la cuenca alta del río Claro a partir de información primaria y secundaria.
3. Generar recomendaciones para adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana.

7. Metodología

El marco metodológico del presente trabajo se orientó bajo la metodología diseñada por AndesPlus para la elaboración de propuesta de adaptación al cambio climático en la alta montaña, publicada en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA). De acuerdo con este marco metodológico, es esencial en la elaboración de propuestas de adaptación al cambio climático en primera instancia, que se definan los objetivos del estudio los cuales deben reflejar un proceso de concertación entre la línea base científica y el diseño e implementación de medidas de adaptación, además se debe precisar el sistema sobre el cual se realizarán los estudios de adaptación (AndesPlus, 2012). Para este caso en específico, el subsistema o unidad de gestión será la cuenca alta del río Claro (figura 6), ya que como argumenta la CEPAL (2002), las cuencas hidrográficas son unidades de análisis óptimas para la gestión ambiental, dado que se conciben como un sistema natural abierto, y complejo donde confluyen el medio biofísico y las prácticas antrópicas (Ferrando, 2003), lo cual hace posible su estudio y valoración desde una mirada sistémica.

Por otra parte, el marco metodológico de AndesPlus recomienda trabajar en dos niveles principales que son consecutivos. El primero corresponde a la caracterización integral del sistema desde siete ejes temáticos: aspectos sociales, climatología, recursos hídricos, glaciología, agroclimatología y seguridad alimentaria, modelamiento ecosistémicos y gestión del riesgo. Este primer nivel busca generar información acerca de cómo y cuánto un sistema reacciona a cambios en el clima, es decir, que tal sensible se encuentra a cambios climáticos y otros factores de estrés. Del mismo modo, esta información científica de base, debe aportar en la comprensión de la resiliencia, vulnerabilidades y capacidades de adaptación de los sistemas, identificando los umbrales críticos de los mismos. El segundo nivel corresponde a la evaluación integral de los impactos del cambio climático que conllevan a una negociación, formulación e implementación participativa de propuestas de adaptación (AndesPlus, 2012).

Cabe señalar que, dado que el objetivo principal del presente trabajo se centra en la formulación de lineamientos para la generación de propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana y no a una propuesta en específico, se realizaron algunas modificaciones al marco metodológico propuesto por AndesPlus, en aras

de responder a las particularidades del área de estudio y la información primaria y secundaria disponible. La figura 5 presenta el desarrollo metodológico del trabajo, posteriormente, se describen con mayor detalle, cada uno de los métodos, técnicas y marco metodológico implementados para cumplir con cada uno de los objetivos estipulados en el marco de la investigación.

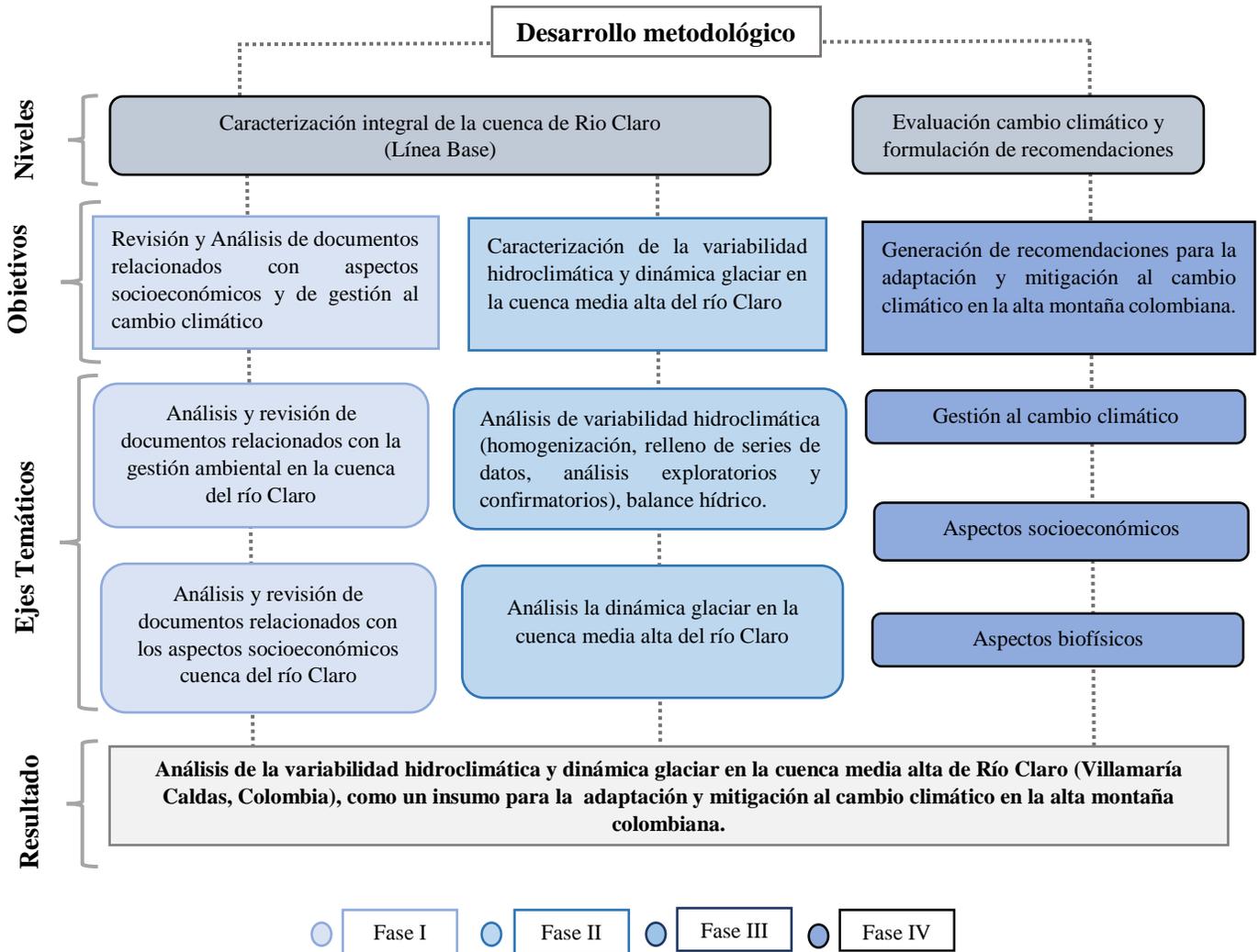


Figura 5. Esquema del desarrollo metodológico. Fuente: Elaboración propia

7.1. Área de estudio

La cuenca medio alta del río Claro posee un área aproximada de 70,4 Km², está ubicada en la vertiente occidental del Volcán Nevado Santa Isabel. Hace parte de las áreas de jurisdicción de las veredas el Páramo y Potosí, municipio de Villamaría, Caldas y además pertenece al Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona amortiguadora. (IDEAM,

2008). Posee zonas intervenidas, bosque de niebla, subpáramo, páramo, superpáramo y zonas nivales. (Parques Nacionales Naturales, 2005). Los afluentes más importantes de esta cuenca son la Quebrada Sietecueales, Quebrada Santa Bárbara, Quebrada Juntas, Quebrada Pantanos y Quebrada El Bosque. Su altitud varía desde los 2400 msnm, en la desembocadura de la Quebrada Nereidas hasta los 4900 msnm en la cumbre del Nevado Santa Isabel. La quebrada fluye principalmente en dirección Noroeste, (Cuero, 2010) (ver figura 6).

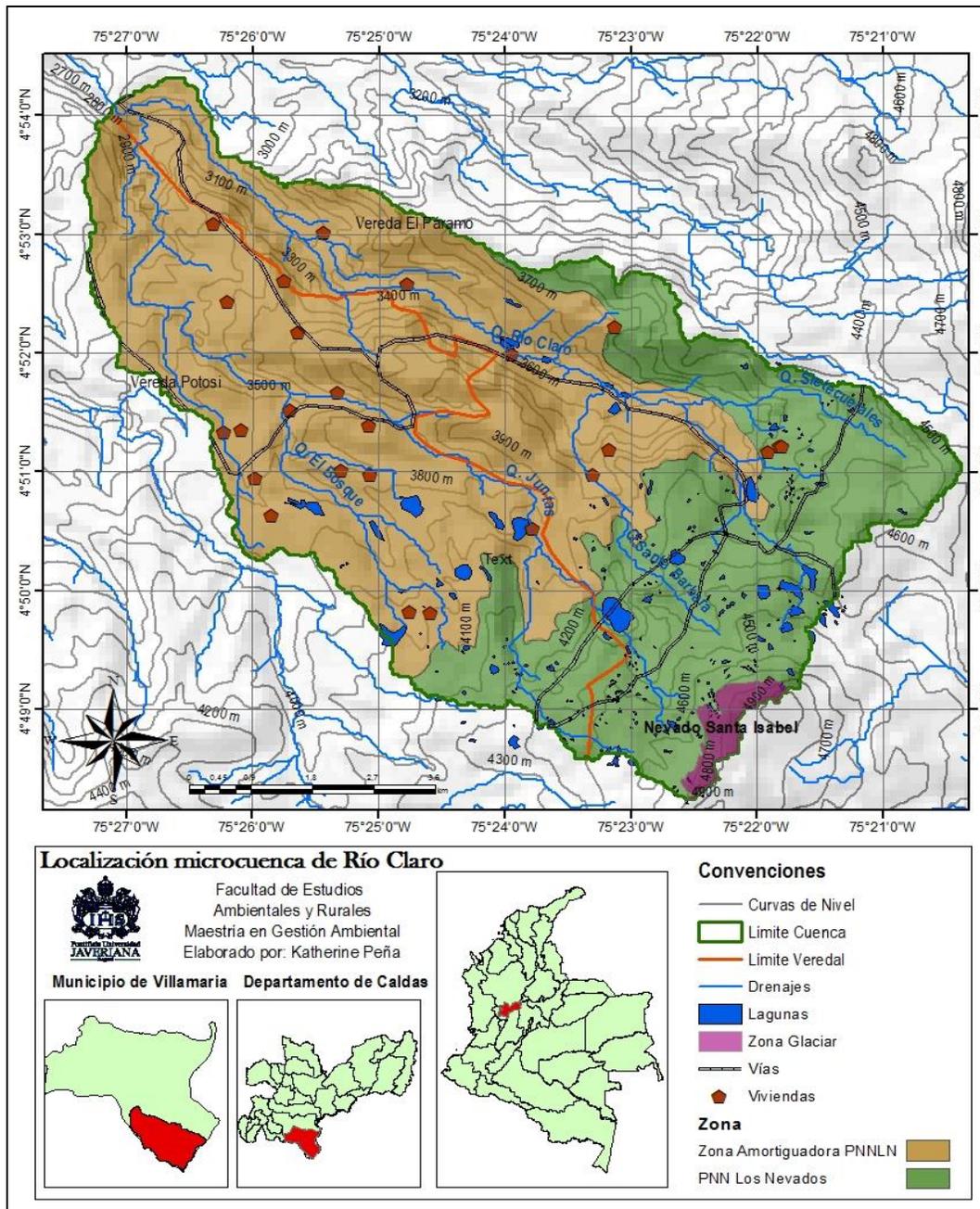


Figura 6 Mapa de la localización de la cuenca media alta de Río Claro. Modificado de: (Prieto, 2008)

Las condiciones climáticas de la cuenca corresponden a condiciones tropicales con una alternancia de los periodos lluviosos (Temporada húmeda) y los periodos secos y una intensidad que depende de la altitud y las condiciones topográficas. Esta zona coincide con la posición media de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), condición que genera circunstancias específicas de circulación de masas de aire y determina algunas de las principales características del clima tales como lluvias abundantes con régimen de distribución bimodal con dos periodos de lluvia máxima uno de abril a mayo y otro de octubre a noviembre, alto contenido de humedad del aire y un régimen térmico poco contrastante a nivel global (CORPOCALDAS & CI, 2005).

La temperatura en la cuenca cambia de acuerdo a las variaciones orográficas, con un gradiente térmico de 0.52°C por cada 100 metros. Los valores de humedad relativa son generalmente constantes con una humedad elevada, cercana al 83%. En general se presentan pocas horas de sol, nieblas frecuentes, vientos fuertes y lluvias de poca intensidad. Las heladas nocturnas se presentan desde los 2000 msnm hasta el superpáramo donde las temperaturas pueden tener valores inferiores a 0°C . Las oscilaciones diurnas de la temperatura son muy pronunciadas, particularmente en el Páramo y superpáramo y atenuadas al interior de los bosques. Las precipitaciones medias anuales de la zona de estudio son del orden de 1400mm, las cuales se manifiestan en forma de lluvia, llovizna, granizo, nieve y escarcha. Las granizadas que son esporádicas se presentan principalmente a partir de los 2500msnm y especialmente en el páramo. Las nevadas son frecuentes por lo general durante la noche a elevaciones superiores de 4000msnm (CORPOCALDAS & CI, 2005).

En cuanto a los aspectos geológicos es de destacar que el paisaje ha sido fuertemente influenciado por los procesos glacio-volcánicos originados en épocas anteriores. Las formaciones geológicas de la zona se encuentran cubiertas por coladas basálticas con dirección este-oeste y depósitos de caída piroclástica procedentes de la actividad volcánica del complejo Ruiz-Tolima. Las rocas más antiguas en el área corresponden a la secuencia polimetamórfica, cuyo primer metamorfismo fue en el Paleozoico temprano, mientras que en el Plioceno se instruyeron cuerpos hipoabisales porfiríticos de composición andesítica y dacítica, Tiempo después de la glaciación Pleistocénica (1.8-0.01m.a) se presentó un nuevo periodo de reactivación volcánica. La presencia de capas piroclásticas que fosilizaron perfiles

de suelo, indican que el vulcanismo continuó hasta épocas recientes con manifestaciones actuales en la actividad del volcán nevado del Ruíz que produjo gran cantidad de ceniza y flujos volcánicos. La intensa erosión fue acelerada por el levantamiento regional durante el Cuaternario y también por la actividad humana que ha contribuido a dar al área su configuración actual (CORPOCALDAS & CI, 2005).

Entre la fauna característica de la zona se encuentra el Tigrillo (*Leopardus tigrinus*); dos especies de Cusumbos (*Nasuella olivacea*) y (*Nasua nasua*); las Tairas (*Eira barbara*) y Comadreja (*Mustela frenata*) y Zorros Comunes (*Cerdocyon thous*), especies generalmente de hábitos nocturnos y crepusculares que habitan las zonas de selvas altoandinas y páramos. Conjuntamente se encuentran especies como Conejo Sabanero (*Silvilagus brasiliensis*), La Guagua de Páramo (*Cuniculus taczanowskii*), y dos especies de venados El Venado Conejo (*Pudu mephistopheles*) y el Venado Soche (*Mazama rufina*) así como la Danta de Montaña (*Tapirus pinchaque*) uno de los mamíferos más amenazados de Colombia. Habitan también en los bosques altoandinos Zariguellas, Armadillos de Nueve Bandas, Puercoespines, y varias especies de Ratones Silvestres de bosque, una especie de Musaraña (*Cryptotis* sp.) y una especie de Murciélago (*Eptesicus fuscus*). Existen más de 255 especies de aves, algunas de ellas muy especializadas a zonas de alturas como el Colibrí Chivito de Páramo (*Oxygomon stubelii*), el Atrapamoscas Dormilona Cenicienta (*Muscisaxicola alpina*), el Cholongo Paramuno (*Grallaria quitensis*), el Cóndor Andino (*Vultur gryphus*) y el Periquito de Los Nevados (*Bolborhynchus ferrugineifrons*) (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2011).

Por otra parte, los ecosistemas, y características geomorfológicas de la cuenca varían de acuerdo a las condiciones orográficas. En la parte más alta, situada en la vertiente occidental del Volcán Nevado Santa Isabel, se encuentra el piso glaciar o nival que se caracteriza por la presencia de una masa de hielo que ha modelado la alta montaña y se considera un importante aportante de agua dulce durante las temporadas secas. La desglaciación atribuida principalmente al cambio climático, ha generado la fracturación de las rocas por la presión del hielo que se forma en las grietas, formación de coladas de barro por la fusión de nieve ocasional, formación de cubetas (zonas cóncavas) por movimiento rotacional del hielo, acumulación de detritos rocosos producidos por el movimiento de la masa de hielo hacia

abajo y un mayor aporte de agua, así como un rápido arrastre de sedimentos hacia los pisos inferiores (Flórez, 1989) (Figura 7).



Figura 7. Límite entre piso glaciar y Periglaciar. Fotografías tomadas por: Nocua, 2015

El límite de la zona glaciar se encuentra sobre los 4700msnm, donde inicia la zona Periglaciar, espacio caracterizado por la presencia de roca desprovista de vegetación y lagunas (figura 7). Esta zona posee temperaturas medias anuales del aire entre 0°C a 3°C, con precipitaciones acumuladas de 1400mm y una humedad de 93%. Cabe señalar que, pese a que la zona Periglaciar se caracteriza por la inexistencia de vegetación, sobre los 4300msnm se han presentado procesos de colonización de vegetación, existiendo la presencia de comunidades vegetales pioneras de aspecto xeromórfico y cobertura discontinua que ocupan la parte más alta de este cinturón altitudinal. Colonizan arenales en proceso de estabilización y/o suelos incipientes muy poco evolucionados (Salamanca, 1987) También se encuentran matorrales o arbustillos que no sobrepasan los 50 cm de altura (Prieto, 2008) (ver figura 8).



Figura 8. Vegetación característica del piso Periglaciar. Fotografías tomadas por: Peña, 2016

Metros más abajo, específicamente entre los 4300 y 4000 msnm, se encuentra el ecosistema páramo, ocupado principalmente por pajonales, gramíneas, (especies de la familia Poaceae) frailejones (Espeletias), cojín de agua, matorrales o arbustales, algunos relictos de bosques de Sietecuecos de Páramo (Familia Melastomataceae), varias especies de Calabazos del género *Gynoxis* y vegetación con predominio del estrato rasante o en algunos casos con un estrato herbáceo pobre en cobertura (ver figura 9) (Rangel, Lowy, & Cleef, 1995). En esta categoría también se encuentran las turberas constituidas por la agrupación de plantas arrosadas que forman los característicos cojines de plantas vasculares, en depresiones del terreno con suelos turbosos muy negros y caracteres hidromórficos, es decir plantas que crecen sobre cubetas, lagunas y lagunetas (Salamanca, 1987). Propiciando de esta manera un ambiente óptimo para la acumulación de musgos y gruesos depósitos de materiales orgánicos. Los musgos y materiales orgánicos sin descomponer tienen la capacidad de almacenar grandes volúmenes de agua; es allí donde se encuentran los nacimientos de muchos arroyos y quebradas (Prieto, 2008). Así mismo, existe la presencia de tres tipos de humedales que se entremezclan con el Páramo: las turberas, los pantanos y las lagunas, algunas de estas estacionales las cuales presentan espejo de agua dependientes de las temporadas de lluvias que se presentan generalmente de forma bimodal en dos épocas del año. (Parques Nacionales Naturales, 2005) .



Figura 9. Ecosistema Páramo cuenca de Río Claro. Fotografías tomadas por: Peña, 2015

Los suelos de este ecosistema (figura 10) se caracterizan por ocupar áreas de relieve ondulado a escarpado, es decir laderas de montaña, cuya inclinación no supera el 50%. Evolucionan a partir de arenas y cenizas volcánicas sobre los cuales actúan procesos erosivos localizados, especialmente escurrimientos difusos y desprendimientos aislados (Prieto,

2008). Poseen varios horizontes oscuros, ricos en materia orgánica, que alternan con capas arenosas de origen volcánico, de colores claros, y presentan inclusiones de afloramientos rocosos y alto porcentaje de aluminio. Son suelos bien drenados, fuertemente ácidos, de capacidad catiónica de cambio alta, contenidos bajos de calcio, magnesio y potasio y muy baja disponibilidad de fósforo asimilable por las plantas. Este ecosistema se desarrolla bajo precipitaciones anuales promedio de 1300 mm aproximadamente, temperaturas medias anuales de 3 a 5°C y una humedad relativa de 87%.

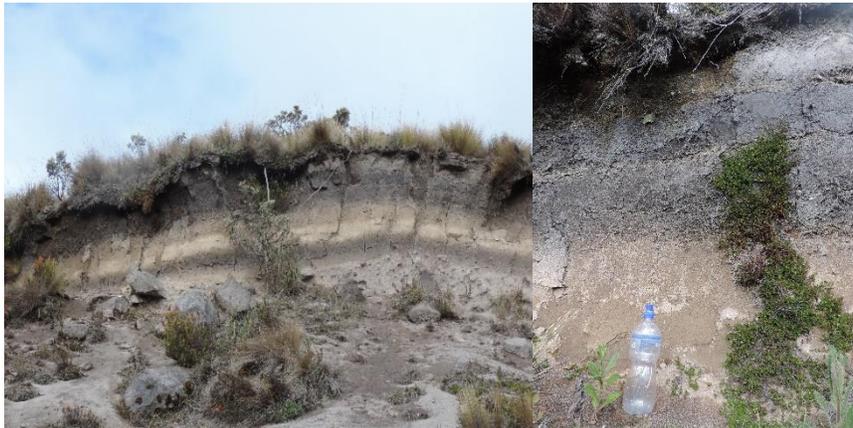


Figura 10. Perfil del suelo del ecosistema Páramo. Fotografía tomada por: Morán, 2015

Sobre los 3800 a 3000 msnm, hacia el piso modelado glacial heredado se encuentra una transición entre la vegetación de páramo y el bosque Altoandino (Bosque Paramuno o Subpáramo), además de prados dedicados a la ganadería. Las áreas de pastos, encontradas a partir de los 4000 m, evidencian la presencia humana. Estas plantas herbáceas, dedicadas a la ganadería, son naturales y/o introducidas y están acompañadas de algunos cultivos de papa. Las personas que realizan estas actividades están asentadas de manera dispersa, encontrando pocas viviendas en la cuenca. A medida que se desciende, en el paisaje de praderas es muy común encontrar pastos Orchoro (*Dactylis glomerata*), Ray grass (*Lolium perenne*) y falsa poa (*Holcus lanatus*), y cultivos de papa fina y parda (*Solanum tuberosum* cv. Parda y Fina) (Prieto, 2008).

Finalmente a 3650 msnm entre los cultivos agrícolas se encuentran relictos de bosque Altoandino, nublado o de niebla (ver figura 11), caracterizado por la presencia de árboles y arbustos entre 3 m y 10 m de alto, que frecuentemente están cubiertos por nubes, recibiendo una cantidad de agua por medio de captación o condensación de pequeñas gotas de agua: esto

influye en el régimen hídrico, en el balance de radiación y en los demás factores y elementos climáticos, hidrológicos, edáficos y ecológicos (Salamanca, 1987). Se encuentran árboles representativos como los Laureles (*Laurus nobilis*), Pinos Colombianos (*Retrophyllum rospigliosii*), Encenillos (*Weinmannia tomentosa*), Magnólias (Genero *Magnolia*), varias especies de Palmas de Cera (Genero *Ceroxylon*), zonas de Chuscales y un número muy variado de plantas epífitas como Bromelias (Familia *Bromeliaceae*) y Orquídeas (Genero *Orchidaceae*) (Parques Nacionales Naturales, 2005). El abastecimiento de leña y la protección de las fuentes hídricas es su principal finalidad (Prieto, 2008). La temperatura media anual de esta zona oscila entre 9 a 11°C, con precipitaciones acumuladas anuales en promedio de 1000mm y una humedad relativa de 92%.



Figura 11. Ecosistema Bosque Altoandino cuenca de Río Claro. Fotografías tomadas por: Peña, 2015

El IDEAM desde el año 2006, instauró una red de observación en el glaciar Conejeras ubicado en el volcán nevado Santa Isabel tendiente a comprender el cambio climático, siendo los glaciares excelentes indicadores de este fenómeno (IDEAM, 2012). Adicionalmente desde el año 2009 la cuenca, cuenta con una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas distribuidas altitudinalmente para el estudio de los tres distintos ambientes de la alta montaña andina colombiana (zona glaciar, Páramo y Bosque Altoandino) y los procesos que controlan la dinámica hidrometeorológica (Ceballos, et al., 2006). En este sentido, esta cuenca se constituye en un punto estratégico para el estudio de los impactos del cambio climático y la generación de lineamientos para propuestas de adaptación y mitigación en la alta montaña colombiana, ya que posee una extensión relativamente pequeña y fácil acceso, presencia de los tres ecosistemas característicos de la alta montaña y población campesina, además de datos hidrometeorológicos y glaciológicos que permiten obtener indicadores confiables de

su estado. Así mismo, su escala es regional, lo que hace posible estimar las implicaciones que tendrían la aplicación de diferentes acciones de adaptación y mitigación sobre sus factores bióticos, abióticos y socioeconómicos.

7.2.Revisión y análisis de documentos y normatividad relacionados con aspectos socioeconómicos y gestión al cambio climático en la cuenca alta del río claro

Para la revisión y análisis de los documentos relacionados con los aspectos socioeconómicos y de gestión am cambio climático de la alta montaña, se tomó con base información primaria obtenida por medio de trabajo de campo y secundaria a partir de documentos de planificación del área de estudio e investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional. A continuación, se detallan los procesos realizados.

7.2.1. Aspectos relacionados con la gestión al cambio climático

El desarrollo metodológico inició con la búsqueda de información relacionada con los conceptos de cambio climático, alta montaña, ciclo hidrológico y gestión ambiental, lo cuales se constituyen en los ejes fundamentales del trabajo. Conjuntamente, se realizó una síntesis de los documentos y normatividad relacionados con la gestión al cambio climático y la alta montaña y analizaron las investigaciones realizadas a diferentes escalas y específicamente en el área de estudio en las temáticas anteriormente relacionadas. Esto, como fundamento para la construcción del marco conceptual y metodológico del presente estudio.

7.2.2. Aspectos relacionados con la gestión al cambio climático

Para el análisis de los aspectos socioeconómicos en la cuenca alta del río Claro, se tomó como base los estudios realizados por Prieto (2008) y Rodríguez (2011), quienes caracterizaron la dinamica socioeconomica de la cuenca, con el fin de establecer el grado de vulnerabilidad de la población de dicha zona ante el cambio en la disponibilidad de agua de fusión glaciar, generada por el cambio climático. Esta información fue validada con visitas realizadas a la zona de estudio, información registrada en el Plan Basico de Ordenamento Territorial (PBOT) de Villamaría del año 2011, el Plan de ordenación y manejo ambiental de cuenca la hidrográfica de Chinchina (POMCA), el Plan de acción inmediato (PAI) de la cuenca de río Claro del año 2008 y el Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Los Nevados 2007-2011. Posteriormente, se tabuló y espacializó a escala 1:50000 en el software ArcGIS.

7.3. Caracterización de la dinámica glaciar y la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Claro

Para la caracterización de la dinámica glaciar y la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Claro, se utilizaron los datos generados por el IDEAM. Se realizó la detección de datos atípicos, así como la homogeneización y relleno de series de datos hidrometeorológicos y se aplicaron procedimientos estadísticos. Para el estudio hidroclimático de las subcuencas (Glaciar, paramo y bosque Altoandino) fue necesario en primera instancia, caracterizar las coberturas de la tierra y posteriormente se calculó el balance y rendimiento hídrico de cada una de estas. Conjuntamente se caracterizaron las aportaciones fluviales mensuales. A continuación, se detallan cada uno de los procesos realizados.

7.3.1. Dinámica glaciar y su relación con el clima

A nivel mundial, los glaciares se constituyen en excelentes indicadores para medir los cambios y variaciones atmosféricas. Por su sensibilidad, se consideran laboratorios de monitoreo del cambio climático. Los tres procedimientos básicos que se han recomendado a nivel internacional para su estudio, son el cálculo periódico del área glaciar, medidas de retroceso del frente glaciar y cálculo de balance de masa glaciológico e hidrológico. El cálculo de áreas glaciares se realiza con base en interpretación de fotografías aéreas o imágenes de satélite y su correspondiente proceso fotogramétrico o procesamiento digital. Por otra parte, la medida de retroceso glaciar consiste en medir periódicamente (dos veces al año) la distancia entre el punto fijo y el borde inferior del hielo obteniéndose así una serie de datos que muestran las velocidades de retroceso. Finalmente, el Balance de Masa representa el equivalente de agua que gana o pierde un glaciar en un tiempo determinado y es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$b_i = \rho_0 \cdot \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

donde b_i corresponde al balance de masa en el sitio i , ρ_0 a la densidad del hielo (generalmente entre 0.82 a 0.92 g/cm³) y Δh a su cambio de espesor. El primer sumando de la ecuación representa el balance del hielo, mientras que el segundo representa el balance del material poroso (nieve, neviza) que cambia en función del tiempo (entre dos mediciones sucesivas) (Francou & Pouyand, 2004). El IDEAM ha calculado el balance de masa el volcán nevado Santa Isabel (glaciar Conejeras), por método directo mediante la instalación de estacas o

balizas (PVC o madera) dispuestas a lo largo de la cuenca glaciar Conejeras y enterradas sobre el hielo a una profundidad no menor a cinco metros sobre las cuales se realizan mediciones mensuales desde el año 2006 para calcular con fórmulas matemáticas la pérdida de espesor de hielo (ablación glaciar) (Francou & Pouyand, 2004). Un concepto clave a manejar en el cálculo del balance de masa, es la Altitud de la Línea de Equilibrio, la cual se define como la zona del glaciar donde no se pierde ni se gana masa, allí el balance de masa es cero y es una variable a la cual se le hace seguimiento a muchos glaciares en el planeta porque ofrece una perspectiva de la velocidad del cambio en la baja atmósfera. Es un dato de altitud (metros). Esta Línea de Equilibrio se designa comúnmente con la sigla ELA (*Equilibrium Line Altitude*). La ELA se calcula matemáticamente con los datos del balance de masa. La ELA es dinámica: Ascende en meses secos y desciende en meses de lluvia. El área glaciar por debajo de la ELA tiende a derretirse. El área glaciar por encima de la ELA tiende a conservarse. (AndesPlus, 2012)

En este sentido, el presente trabajo analiza los tres componentes principales en el estudio de la dinámica glaciar (áreas, frente glaciar y balance de masa) con base en los datos suministrados por el IDEAM, complementándolo a su vez con un análisis estadístico multivariante que tiene como objetivo analizar en qué medida un conjunto de variables independientes (precipitación, temperatura, e índices ENSO) pueden explicar la variabilidad del balance de masa del glaciar, para así lograr comprender la relación entre el clima y la dinámica glaciar. Ello se realizó mediante un análisis de regresión lineal múltiple, ajustado por mínimos cuadrados. Dicho modelo fue elaborado y ejecutado en el software R.

7.3.2. *Análisis de la variabilidad hidroclimática de la cuenca alta del río Claro*

Para determinar la variabilidad espacio-temporal del clima y los recursos hídricos en la zona de estudio se seleccionaron las series de datos de las estaciones hidrometeorológicas, que constituyen la red de monitorización instalada por el IDEAM en el 2008, y que están distribuidas latitudinalmente en la cuenca del río Claro desde los glaciares situados a 4.900 m hasta los bosques Alto andino en torno a los 2700 m. Se tuvo en cuenta como criterio de selección que las series no presentaran ausencia de datos anuales de más de 20%. El periodo de estudio se estableció desde enero de 2009 a mayo de 2016. Cabe señalar que dichas series de datos cuentan con 7 años de registro, por lo cual no cumplían con el periodo mínimo

estipulado por el IPCC (2013) para el estudio del clima y su variabilidad. Por tanto, se utilizaron las series de datos históricas (33 años de registro) de una estación aledaña al área de estudio llamada Brisas ubicada sobre los 4150m. Las variables en las que se fundamentan los análisis climáticos de este trabajo son las precipitaciones mensuales y diarias, (mm) y las temperaturas medias, máximas y mínimas, diarias y mensuales (° C). Por otra parte, para los análisis hidrológicos se utilizaron las aportaciones fluviales anuales (litros) mensuales (litros) y los caudales medios diarios (l/s^{-1}). Las series de datos climáticos fueron proporcionadas por el IDEAM. En la tabla 1, figura 12 se presentan los detalles de las series de datos seleccionadas y su ubicación.

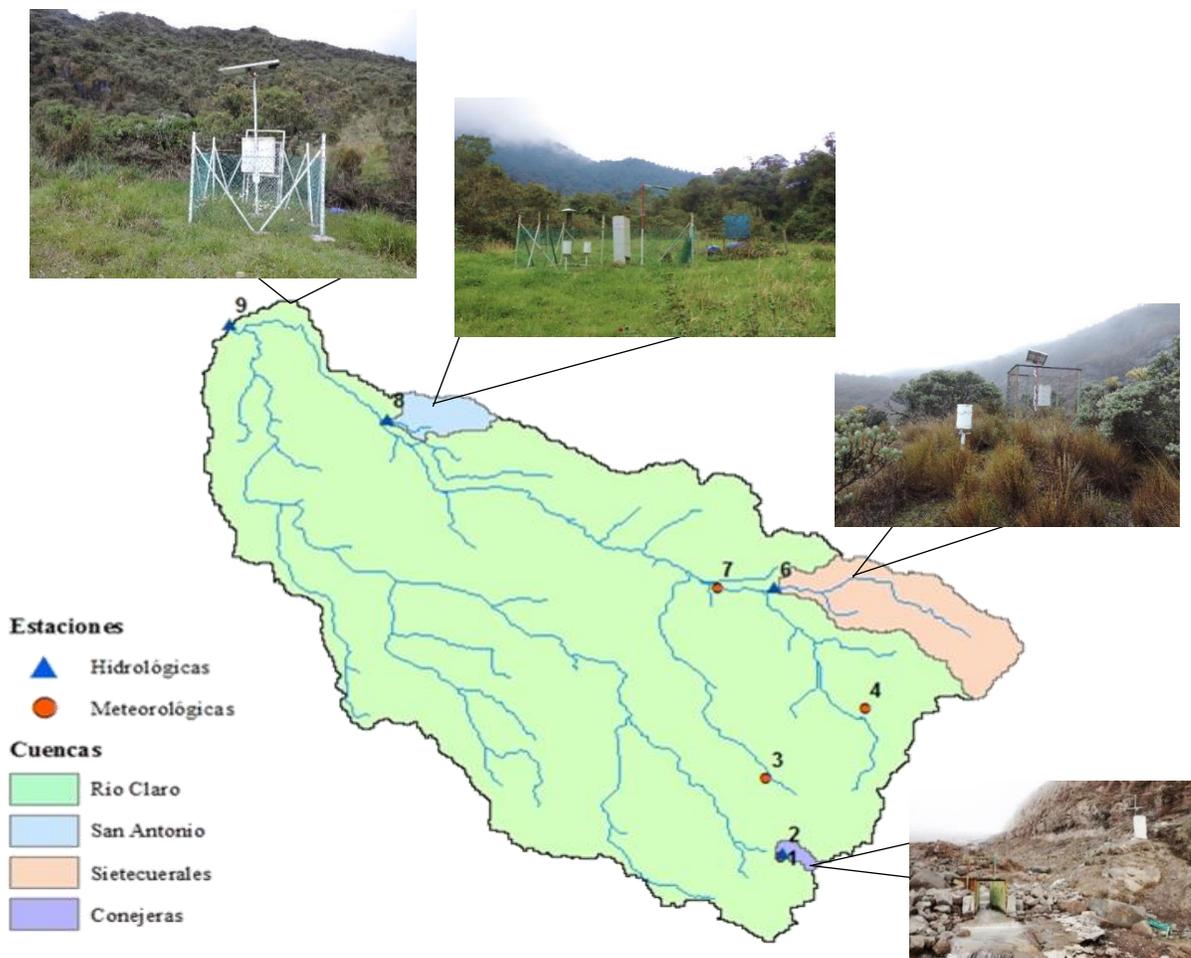


Figura 12. Red hídrica e Instrumentalización situada en la cuenca alta del río Claro. Fuente: Elaboración propia. Fotografías tomadas por: Peña, 2015

Tabla 1. Características de las series de datos de la cuenca alta del río Claro

Número	Nombre de la estación	Código	Tipo de estación	Altitud	Periodo de registro
1	Estación Nevado de Santa Isabel	26135320	Meteorológica	4.757	2010-2016
2	Estación Conejeras	26157160	Hidrometeorológica	4.695	2009-2016
3	Estación Páramo Conejeras	26155250	Meteorológica	4.413	2009-2016
4	Estación Sendero Laguna Verde	26155260	Meteorológica	4.325	2009-2016
5	Estación Brisas	26155150	Meteorológica	4.150	1982-2014
6	Estación Sietecuerales	26157200	Hidrológica	3.794	2009-2016
7	Estación PNN Nevados	26155240	Meteorológica	3.637	2009-2016
8	Estación San Antonio	26157210	Hidrometeorológica	3.064	2009-2016
9	Estación Río Claro	26157190	Hidrológica	2.712	2009-2016

Fuente: elaboración propia

7.3.2.1. Homogeneización y relleno de datos ausentes en series de datos

Una vez definidas las estaciones y periodo de estudio, se procedió a eliminar las inhomogeneidades y *outliers*, para obtener series homogéneas, es decir, series en la que las variaciones son producidas exclusivamente por causas naturales (Easterling & Peterson, 1995). Para ello, se identificaron los datos de cada mes que presentaran valores por encima de 4 desviaciones estándar respecto a los 3 observatorios más cercanos en los que se disponía de registros en dicho mes. Estos datos se etiquetaron y se comprobó si respondían a condiciones climáticas extremas por medio de la comparación con datos de las estaciones cercanas, si resultado de esto el dato correspondía a una disparidad, se eliminaba (Morán-Tejeda, 2011). Posteriormente se realizó el relleno de datos ausentes, que se llevó a cabo en el software R, mediante un método basado en los cuantiles de la función de distribución acumulada de las series candidatas (series con datos vacíos) y las series de referencia (series sin vacíos). Previamente se calcula una matriz de correlación entre las series, y se selecciona un umbral de coeficiente de correlación de Pearson de > 0.7 . Aquellas series que presenten una correlación mayor a dicho umbral con la serie candidata, se seleccionarán como series de referencia. Las series son posteriormente convertidas en series de cuantiles, basados en su función de distribución acumulada (Morán-Tejeda, comunicación personal, 2015). El proceso del relleno de los datos vacíos incluye: 1) se selecciona la serie de referencia más correlacionada; si los valores ausentes de la serie candidata coinciden con valores de cero en la serie de referencia, el vacío se rellenará con un cero; 2) de lo contrario se calcula el cuantil

de la serie de referencia (Q_{ri}) que corresponde con el registro vacío en la serie candidata, posteriormente se busca el mismo cuantil en la serie candidata (Q_{ci}) y dicho valor rellena el vacío. De esta forma nos aseguramos que los valores que rellena los vacíos, son extraídos de la propia serie candidata, y no de series ajenas. Si la serie de referencia más correlacionada no presenta datos en el mismo registro, entonces se seleccionará la segunda serie más correlacionada, y así sucesivamente hasta que el umbral de $R = 0.7$ sea alcanzado. La ventaja de este método sobre otros del tipo regresión lineal, es que no se alteran las propiedades estadísticas de las series rellenas, y por lo tanto se mantiene su función de densidad de probabilidad (Morán-Tejeda, comunicación personal, 2015). Completadas las series de datos, se hicieron análisis exploratorios y confirmatorios (análisis de tendencias) de las series de precipitación, temperatura y caudal.

7.3.2.2. *Análisis de tendencias hidroclimáticas*

Para el análisis de tendencias climatológicas, únicamente en aquellas series con más de 30 años de periodo de registro, se utilizó el test no paramétrico de Mann-Kendall, el cual se basa en los rangos de los registros en la serie de datos, en vez de en el valor de los mismos. El test de Mann-Kendall ha sido ampliamente utilizado por la académica dada su alta validez y robustez en la detección de tendencias de series hidrológicas y climáticas (Hirsch *et al.* 1982, Berryman *et al.* 1988, Sneyers 1992, Yue *et al.* 2002, Morán-Tejeda, 2011), ya que, a diferencia de otros tests paramétricos como el de Pearson, éste es independiente a la distribución de frecuencias de los datos, incluso a la existencia de outliers. Cabe señalar que antes de realizar la aplicación del test estadístico, se definieron las hipótesis que se buscaban confirmar o rechazar. Para este caso en específico, la hipótesis nula (N_0) correspondería al caso en que no se presentaran cambios graduales en las series de datos en determinado periodo, y la hipótesis alterna (N_1) al caso en el cual la media aumentara o disminuyera al largo del tiempo (Kundzewicz & Robson, 2004). El test se basa en un algoritmo de correlación entre la variable X (años) y la variable Y (precipitación y temperaturas). Las observaciones se ordenan, separadamente, de forma ascendente y son reemplazadas por sus rangos. Este test además se basa en el estadístico S, que se define como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

donde x son los valores de la secuencia de datos, n es la longitud de la serie de datos y

$$\text{sgn}(\varphi) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si } \varphi > 0 \\ 0 & \text{si } \varphi = 0 \\ -1 & \text{si } \varphi < 0 \end{array} \right\}$$

Este test nos presenta como resultado dos parámetros que nos permiten identificar la existencia de tendencias en las series, así como su magnitud. El primero de ellos es el estadístico tau τ , y nos indica el signo (positivo o negativo) de la tendencia, y su intensidad:

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{\frac{N^2 - N - T_x}{2}} \sqrt{\frac{N^2 - N - T_y}{2}}}$$

Donde N es el número de observaciones y T para las variables x e y :

$$T_{x,y} = \sum t^2 - t$$

siendo t las observaciones en las que hay empates entre valores, y por lo tanto ocupan el mismo rango. Un tau = 0 indica la inexistencia de tendencia (N_0). Cuando los valores se alejan de cero, estaríamos ante la existencia de una tendencia (N_1), positiva si los valores son positivos y negativa si los valores son negativos. El segundo parámetro, y tal vez el más importante, es la significación estadística (α) que mide, en términos de probabilidad, si el valor de la pendiente obtenida es diferente del rango de valores que tendría bajo la hipótesis nula. Ello nos indica por lo tanto la probabilidad de que podamos rechazar o no, con certeza, la hipótesis nula. El nivel de significación se obtiene según:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{d}}$$

Donde d es la varianza de S . Un valor de α suficientemente pequeño nos indica que es muy poco probable que la tendencia sea causada por un muestreo aleatorio, y por lo tanto la hipótesis nula puede ser rechazada. Con un nivel de significación de 0,05 (si $\alpha < 0,05$) se considera que la tendencia es estadísticamente significativa con una probabilidad de certeza un 95%, umbral crítico considerado en este trabajo para establecer la existencia de tendencias significativas.

7.3.2.3. Análisis hidroclimático de las subcuencas de estudio (Glaciar, Páramo y Bosque Altoandino)

Por otra parte, para el análisis hidrológico de las subcuencas de estudio (Glaciar, páramo y Bosque Altoandino) fue necesario en primera instancia, caracterizar las coberturas de la tierra de la cuenca. Posteriormente se realizó el cálculo del balance y rendimiento hídrico de las subcuencas de estudio y se analizaron de acuerdo a las coberturas. Conjuntamente se caracterizaron las aportaciones fluviales mensuales y su relación con el clima. A continuación, se detallan cada uno de los procesos realizados. La interpretación de las coberturas de la tierra de la cuenca alta del río Claro, se realizó en el software ArcGIS, con el apoyo del mapa de coberturas de la tierra de Colombia 2010-2012, escala 1:100.000, elaborado por el IDEAM, según la metodología CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover adaptada para el país. Esta metodología tiene como propósito la realización del inventario homogéneo de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite asistida por computador y la generación de una base de datos geográfica (IDEAM, 2010). Cabe señalar que, debido a la escala del mapa nacional comparado con el del área de estudio y el tiempo evaluado, fue necesario comprobar en situ y con ayuda de imágenes de satélite Landsat 8 el estado de las coberturas y realizar cambios de acuerdo con la información observada. Se realizaron cambios a los polígonos de bosque, lo cuales no había sido caracterizados en la cartografía nacional.

Una vez caracterizadas las coberturas de la tierra, se procedió a analizar la dinámica del recurso hídrico en las cuatro subcuencas en las que el IDEAM tiene control hidrométrico. Para ello, se solicitaron al IDEAM las curvas de gasto de las estaciones hidrológicas ubicada en la cuenca del río Claro (Conejeras, Sietecuerales, San Antonio y Río Claro, ver figura 7), y se convirtieron los datos nivel del agua (m) a caudal (l/s). Posteriormente y con el fin de caracterizar el comportamiento de los caudales en las dimensión espacial y temporal, se realizó el balance hídrico para los siete años de registro (2009-2016) de las estaciones hidrológicas. Según IDEAM (2014), la guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur indica que, para cualquier masa de agua, en áreas extensas y en largos periodos de tiempo, se puede utilizar la ecuación de balance para estimar la oferta

hídrica media anual, en términos de precipitación y evapotranspiración. La expresión simplificada de la ecuación para el balance anual es la siguiente:

$$ESC = P - ETR$$

dónde: ESC = Escorrentía hídrica superficial (mm) P = Precipitación (mm) ETR = Evapotranspiración real (mm) (IDEAM, 2014). El cálculo de la escorrentía (mm) superficial en cada una de las subcuencas, se realizó dividiendo los aportes fluviales anuales (litros) en su respectiva área (m²) obteniendo como unidad de análisis l/m² (1 mm equivale a 1 l/m²). Por otra parte, mediante la implementación de los polígonos de Thiessen en el software ArcGIS se evaluó el área de influencia de la precipitación de acuerdo a la posición de las estaciones pluviométricas, estableciendo de esta manera una correspondencia entre cada una de las subcuencas con una o varias estaciones pluviométricas concretas. De esta forma, se calcularon las precipitaciones acumuladas anuales en cada subcuenca ponderando el valor de la precipitación de cada estación por el área de influencia de los polígonos de Thiessen obtenidos. Vale mencionar que las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en la subcuencas de Río Claro, no registran datos de evapotranspiración, por lo cual fue necesario estimarlos. Para ello, se utilizó el Software ETo Calculator, desarrollado por la División Tierra y Agua de la FAO en el año 2009, con el objetivo de calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) de acuerdo con las normas de esta entidad. ETo Calculator evalúa la ET_o a partir de datos meteorológicos por medio de la ecuación FAO Penman-Monteith. Este método ha sido seleccionado por la FAO como la referencia, ya que es muy preciso en la estimación de la ET_o, al incorporar parámetros fisiológicos y aerodinámicos (FAO, 2015). La forma original de la ecuación de Penman-Monteith puede ser escrita como:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_a - e_d) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)}$$

Donde λET_0 corresponde al flujo del Calor Latente de Evaporación [kJ m⁻² s⁻¹], R_n el flujo de la Radiación neta en superficie [kJ m⁻² s⁻¹], G al Flujo térmico del suelo [kJ m⁻² s⁻¹], ρ a la densidad atmosférica [kg m⁻³], c_p es el calor específico del aire húmedo [kJ kg⁻¹ °C⁻¹], $e_a - e_d$ representa el déficit de Presión de Vapor [kPa], r_c la resistencia de la cubierta vegetal [s m⁻¹] y r_a la resistencia aerodinámica [s m⁻¹], Δ es la pendiente de la curva de presión de

vapor [kPa °C⁻¹] y “ γ ” la Constante Psicrométrica [kPa °C⁻¹]. Según esta fórmula, el enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos (FAO, 2015).

Los valores fueron calculados diariamente y posteriormente se hallaron los valores acumulados anuales para el cálculo de balance hídrico. Adicional a la escorrentía expresada en lámina de agua (mm) y el balance hídrico, la oferta hídrica superficial en las subcuencas hidrográficas de estudio se expresaron en rendimiento hídrico o caudal específico, el cual representa la cantidad de agua por unidad de superficie en un intervalo de tiempo dado (l/s/km²) (IDEAM, 2014). Otro indicador implementado en el presente trabajo para caracterizar el comportamiento interanual de los ríos, y que ofrece información relevante sobre la hidrología de la cuenca es el régimen fluvial. Éste representa la distribución de los caudales o aportes fluviales mensuales a lo largo del año, permitiendo identificar visualmente cómo es o ha sido la variabilidad intra-anual de los caudales, e interpretar los procesos responsables de potenciales cambios. Esta herramienta proporciona información muy útil, pues permite identificar y pronosticar los meses del año en el que ocurren los máximos y los mínimos caudales, así como las características climáticas o fisiográficas de una cuenca (Krasovskaia & Gottschalk, 2002).

7.4.Recomendaciones para la generación de propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana

Una vez se identificó la sensibilidad del sistema de estudio (cuenca alta media de Río Claro) a los cambios climáticos y otros factores de estrés, así como la resiliencia, vulnerabilidades y capacidades de adaptación de cada una de los subsistemas, mediante la caracterización y valoración integral de la cuenca, se procedió a trabajar el segundo nivel estipulado en el marco del presente trabajo, el cual tiene por objeto evaluar los impactos del cambio climático en el área de estudio, con el fin establecer lineamientos básicos para la generación de propuestas de adaptación al cambio climático en la alta montaña colombiana, como una etapa concluyente del proceso.

8. Resultados y Análisis

8.1. Gestión al cambio climático y la alta montaña cuenca alta del río Claro

La gestión ambiental en la cuenca alta del río Claro se ha realizado a través de instrumentos de planificación tales como el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Villamaría, el Plan de acción inmediato (PAI) de la cuenca de Río Claro, el Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Los Nevados, el Plan de Manejo de Páramos del Departamento de Caldas y el Plan de Desarrollo del Municipio de Villamaría 2012-2015. El PBOT del municipio de Villamaría adoptado mediante el acuerdo 070 de 2011, establece en el artículo 127 al Parque Nacional Natural Los Nevados (PNN Los Nevados) y al río Claro como un área de esparcimiento dada su gran riqueza paisajística. Además, estipula en el parágrafo 1 al río Claro como un área para explotación de material de arrastre y como un posible foco de contaminación a consecuencia de la caída de las aguas servidas de los centros poblados y la contaminación generada por las actividades productivas agropecuarias.

Por otra parte, el PAI que está en ejecución en la actualidad, sostiene que la cuenca del río Claro presenta un fuerte deterioro ambiental a causa de la presión que están ejerciendo las actividades antrópicas asociadas a la infraestructura vial y los sistemas agropecuarios desarrollados en la zona. Limitando de esta manera la calidad y oferta de su patrimonio natural, aspecto visible en la erosión, inestabilidad generalizada de la cuenca, deforestación, pérdida del potencial productivo de los suelos, y degradación de humedales y ecosistemas de páramos; lo que repercute en la calidad de vida de comunidades rurales que habitan dicho territorio (CORPOCALDAS, 2011). A consecuencia es esto, la Alcaldía de Villamaría, la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas), la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC SA ESP), y la Empresa de Servicios Públicos (Aquamaná), a través de un proceso de gestión ambiental celebraron un convenio interadministrativo centrado en el desarrollo de cuatro proyectos para el desarrollo sostenible de la cuenca: 1. Recuperación, Restauración y Conservación de Bosques en la Cuenca del Río Claro, 2. Reconversión de sistemas agropecuarios de la cuenca de Río Claro. 3. Nodos estratégicos de turismo en el río Claro y 4. Gestión del Riesgo. Conjuntamente se planteó la implementación de un instrumento de monitoreo hidrológico que permitiera evaluar las condiciones de pluviosidad y evaluación de escorrentía en los diferentes ecosistemas de la cuenca. Entre los resultados

obtenidos de los proyectos, se encuentran la identificación de predios con un uso inadecuado del suelo, formulación de una propuesta para la reglamentación del uso agrícola del suelo con los predios identificados, reconversión agrícola y ganadera, establecimiento y mantenimiento de especies forestales y asistencia técnica y capacitaciones a los productores (CORPOCALDAS, 2011). Cabe señalar que, aunque en el marco de este proyecto se gestaron iniciativas para la conservación y sostenibilidad de la cuenca a la fecha no se han implementado dichas iniciativas de manera eficiente lo que ha conllevado a que el medio natural continúe su declive hacía la contaminación y deforestación.

El plan de manejo del PNN Los Nevados estableció de acuerdo con el Decreto 622 de 1977, a la cuenca del río Claro sobre la cota de 4000 msnm, como zona intangible, en la cual el ambiente ha de mantenerse ajeno a las más mínimas alteraciones humanas, a fin de que las condiciones naturales se conserven a perpetuidad. Entre las actividades que se encuentran permitidas realizar en la zona están la conservación, recuperación y control, investigación, educación y el turismo, pero con ciertas restricciones (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2011). Conjuntamente, en el Plan de Manejo de los Páramos del departamento de Caldas adoptado en el marco de la Resolución No. 0769 de 2002 que establece como una obligación de las Corporaciones Autónomas Regionales la generación sobre el estado y manejo de los páramos de su jurisdicción, se realizó un diagnóstico de los factores bióticos, abióticos y sociales del área de estudio en donde se observó que existen fenómenos erosivos que están afectando a la cuenca del río Claro, la cual es considerada como una de las áreas más inestables y vulnerables del departamento de Caldas. En respuesta a este fenómeno, el Plan de Manejo estipuló dar prioridad al mantenimiento de coberturas vegetales adecuadas para brindar estabilidad al suelo y aportar en la regulación de los flujos hídricos durante la precipitación pluvial. Así mismo, se propuso una zonificación por sectores a partir de recomendaciones de los actores locales, y la revisión y análisis de los planes de manejo y de ordenamiento territorial. La cuenca alta del río Claro hace parte del sector I, en donde se establecieron tres zonas: Zona de Conservación, conformada por todos los fragmentos de bosque Altoandino y páramos existentes en la zona protegida y amortiguadora del PNN Los Nevados; Zona de Restauración, la cual busca generar una conectividad entre los fragmentos de bosque y páramo, y la Zona de Uso Sostenible, donde se espera que los actores locales implementen un manejo ambiental adecuado en sus actividades productivas. Esta

zonificación fue aprobada por todos los propietarios de la cuenca. No obstante, manifestaron una preocupación por realizar sus prácticas productivas y sustentaron que de realizarse dicha zonificación se verían obligados a vender sus predios puesto que muchas de las áreas no podrían ser explotadas económicamente, dado los beneficios que genera a las sociedades humanas en términos de servicios ecosistémicos (CORPOCALDAS & CI, 2007).

Finalmente, el Plan de Desarrollo del Municipio de Villamaría 2012-2015, establece dos programas para la gestión del medio ambiente. El primero enfocado a la gestión integral de las cuencas, y el segundo a la educación ambiental. Este plan propone dar continuidad al PAI del río Claro, e implementar medidas de reforestación y mecanismos de compensación por servicios técnico ambientales. Este plan desconoce lo relacionado con la alta montaña y el cambio climático (Secretaria de Planeación Municipio de Villamaría, 2012).

Una vez analizados los instrumentos de planificación que se han implementado en la cuenca del río Claro enfocados a la gestión del ambiente y los recursos naturales y a modo de conclusión de la presente investigación, es preciso señalar que, aunque la institucionalidad con jurisdicción en el área de estudio reconoce la importancia de los ecosistemas de la alta montaña y han aunado esfuerzo para el estudio y análisis del deterioro ambiental de la cuenca asociado a las actividades antrópicas; no se han realizado estudios enfocados a caracterizar los impactos del cambio climático y las medidas de adaptación y mitigación más efectivas para contrarrestar sus efectos en el medio natural y social, conllevando a la institucionalidad a un desconocimiento y ausencia de medidas eficaces e instrumentos de planificación para dar frente a este gran fenómeno medioambiental. Esto sumado a la frágil planificación ambiental del territorio, evidenciada en el PBOT de Villamaría y la ausencia de un POMCA en la cuenca del río Claro ha propiciado que los ecosistemas de la alta montaña sean cada vez más vulnerables y menos resilientes al cambio climático.

Por otra parte, pese a que a nivel nacional el MADS haya apoyado la conformación de Nodos Regionales de Cambio Climático como una medida de descentralización de las acciones nacionales y el empoderamiento de los entes territoriales para fortalecer la gestión del cambio climático en Colombia, hasta el momento en el departamento de Caldas no se ha realizado ninguna acción asociada a esta iniciativa. Según el MADS, (2013), la planeación y gestión a largo plazo, se constituye en aspectos esenciales para disminuir y mitigar daños, pérdidas o

debilitamiento de los sistemas naturales y sociales por efectos del clima, puesto que es este factor, “el clima” un importante condicionante en el uso del territorio y la disponibilidad de los servicios ecosistémicos, siendo el más notable el aprovisionamiento de agua. En este sentido, las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña deben estar enmarcadas en los instrumentos de planificación formulados a diferentes escalas y en diferentes ámbitos a fin de lograr su validez e implementación. Para esto, es necesario apoyarse en los instrumentos y hojas de ruta que se han elaborado a nivel nacional tales como los Lineamientos para Incluir Cambio Climático en los Planes de Desarrollo de los Departamentos y Municipios de Colombia y la Hoja de Ruta para la Elaboración de los Planes de Adaptación Dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático entre otros (MADS, 2016).

8.2.Aspectos socioeconómicos cuenca alta de Río Claro

Como se mencionó en la metodología del presente trabajo, para el análisis de los aspectos socioeconómicos de la cuenca alta del río Claro, conformado por características demográficas, calidad de vida, organización social y actividades productivas, se tomó como base los estudios de Prieto (2008) y Rodríguez (2011), quienes realizaron la caracterización de los datos catastrales y socioeconómicos de las veredas correspondientes al área de estudio a partir de la revisión la de información primaria suministrada por el Intituto Geografico Agustín Codazzi (IGAC), CORPOCALDAS, Alcaldía del municipio de Villamaría (Dependencias de Planeación, SISBEN y UMATA) y Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNLN). Dicha información fue validada y complementada con el posterior trabajo de campo. A continuación se presentan los resultados:

La población que habita la cuenca alta del río Claro, presenta un modelo poblacional disperso, conformando por grupos de familias mayoritariamente oriundas de Caldas, Risaralda y Tolima y en menor grado de Cundinamarca y Boyaca (Parques Nacionales Naturales, 2005). Se encuentran asentados a grandes distancias por lo cual no sostienen fuertes relaciones sociales entre si (CORPOCALDAS & CI, 2007). La mayor población de los grupos domesticos se encuentran en edades de los 18 a 59 años contrario a la presencia de adultos mayores la cual es minima, inidicando alta productividad de las fincas ubicadas en la zona de estudio. La cantidad de personas por grupo doméstico varía entre 3 y 5,

información que permite estimar que, en las 26 viviendas de la zona, se alojan un aproximado de 100 personas (Prieto, 2008).

En cuanto a la prestación de servicios públicos, se denota déficit en la prestación tanto sociales como públicos, reflejado a su vez en las precarias condiciones de vida de la población. La energía eléctrica, servicio manejado por la CHEC (Central Hidroeléctrica de Caldas), es el único servicio prestado por el municipio, sin tener una cobertura total. El acueducto, el alcantarillado y el aseo son servicios individuales o grupales que la población adopta para suplir sus requerimientos. Para el abastecimiento del recurso hídrico, las comunidades campesinas captan el agua por medio de mangueras directamente de los afluentes o nacimientos donde se encuentran asentados, puesto que la distancia entre las viviendas ha dificultado la construcción de acueductos veredales. La captación realizada, no cuenta con concesiones otorgadas por las autoridades ambientales. Existe poca reglamentación y gestión del recurso hídrico en esta región. Así mismo, las comunidades carecen de infraestructura de purificación de desarenadores, lo cual los hace muy vulnerables al consumo de sólidos suspendidos por sedimentación y contaminación de arrastre de químicos procedentes de los cultivos de papa (CORPOCALDAS & CI, 2005).

La captación del recurso hídrico tiene tres usos principales: doméstico; uso agrícola, utilizado para la fumigación y aseo de implementos de trabajo y el uso pecuario implementado para el llenado de bebederos, aseo de establecimientos de animales y aseo de implementos de campo. El llenado de bebederos, el aseo del hogar y la preparación de alimentos son las actividades que requieren mayor cantidad de agua, mientras que la fumigación de cultivos es la que menos gasta el recurso. En este sentido, la mayor cantidad de agua es utilizada para la producción pecuaria, seguido de la actividad doméstica y la agrícola respectivamente (Prieto, 2008).

La inexistencia de alcantarillado es una constante en la cuenca. Solo existen dos pozos sépticos, uno en la escuela Potosí y otro en la casa El Cisne a cargo actualmente de Parques Nacionales Naturales. Los predios restantes reemplazan el alcantarillado por zanjas en la tierra o tubos que dirigen las aguas residuales a las quebradas más cercanas, hecho que puede perjudicar no solo la calidad del agua, sino además la del suelo. Esta afectación por aguas residuales tiene un carácter regional, al afectar no solo el área de la cuenca sino zonas

inferiores a la misma. (CORPOCALDAS & CI, 2005). Caso similar ocurre con el manejo de los residuos sólidos basado en la quema de plásticos y el entierro de los desechos producidos diariamente, lo cual se ha convertido en una fuerte problemática ambiental dada la producción de grandes cantidades de desechos resultado de las actividades agrícolas y pecuarias cuya disposición final es a cielo abierto sin previo tratamiento, en los cauces de agua o incineración (CORPOCALDAS, 1999).

La comunidad de la cuenca se encuentra organizada en una Junta de Acción Comunal, que ejerce hace 20 años en la vereda Potosí y la Junta de Padres de Familia (CORPOCALDAS & CI, 2005). Sin embargo, por la precariedad e incumplimiento de sus funciones, se ponen en duda su existencia. Los habitantes de la zona aseguran que, por la falta de participación y acción de estas organizaciones, perdieron su legalidad. En términos institucionales, los pobladores de la cuenca solo reconocen la presencia de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN), quien, en ocasiones, capacita a la comunidad sobre condiciones y manejo adecuado del parque. La Alcaldía Municipal, por medio de sus oficinas delegadas para la salud (SISBEN), la educación o el apoyo agropecuario (UMATA), debería tener presencia en la zona, pero la situación es contraria. La ausencia de tales servicios básicos es casi total, lo cual es justificado, en alguna medida, con el gran control que ejercen algunos terratenientes en la zona. Entidades como CORPOCALDAS, IDEAM, Universidad Nacional de Manizales, Universidad del Valle y algunas fundaciones y ONG ambientales, han trabajado y analizado algunas características ambientales importantes de la zona, dando como resultado diversas investigaciones. Este hecho evidencia una presencia, pero no una gestión (Prieto, 2008).

Las comunidades campesinas que habitan en la cuenca son en su mayoría población flotante conformada casi en su totalidad por los agregados o jornaleros que no permanecen allí durante mucho tiempo y están cambiando de sitio de trabajo permanentemente. Se encuentran bajo la modalidad de parcelación (CORPOCALDAS & CI, 2007), que consiste en trabajar en las fincas realizando las actividades productivas enfocadas en la agricultura (cultivo de papa) y la ganadería (producción de leche), a cambio de hospedaje y una compensación económica (salario mínimo). Además, la actividad agrícola es recompensada con un pago

por jornal o con la mitad de las ganancias recogidas por cosecha. De esta manera, son mínimos los propietarios de las tierras que vivan en la cuenca.

Tabla 2. Usos del suelo en cuenca alta del río Claro

Uso del suelo	Área (Km2)	Porcentaje (%)	Altura (msnm)
Protección, investigación y turismo	32	45,5%	3900-4900
Protección y producción de leña	10,4	14,7%	2700- 3900
Producción ganadera	27,5	39,2%	2700- 3900
Producción agrícola	0,49	0,7%	2700- 3900
Total	70,4	100	-

Fuente: Modificado de (Prieto, 2008)

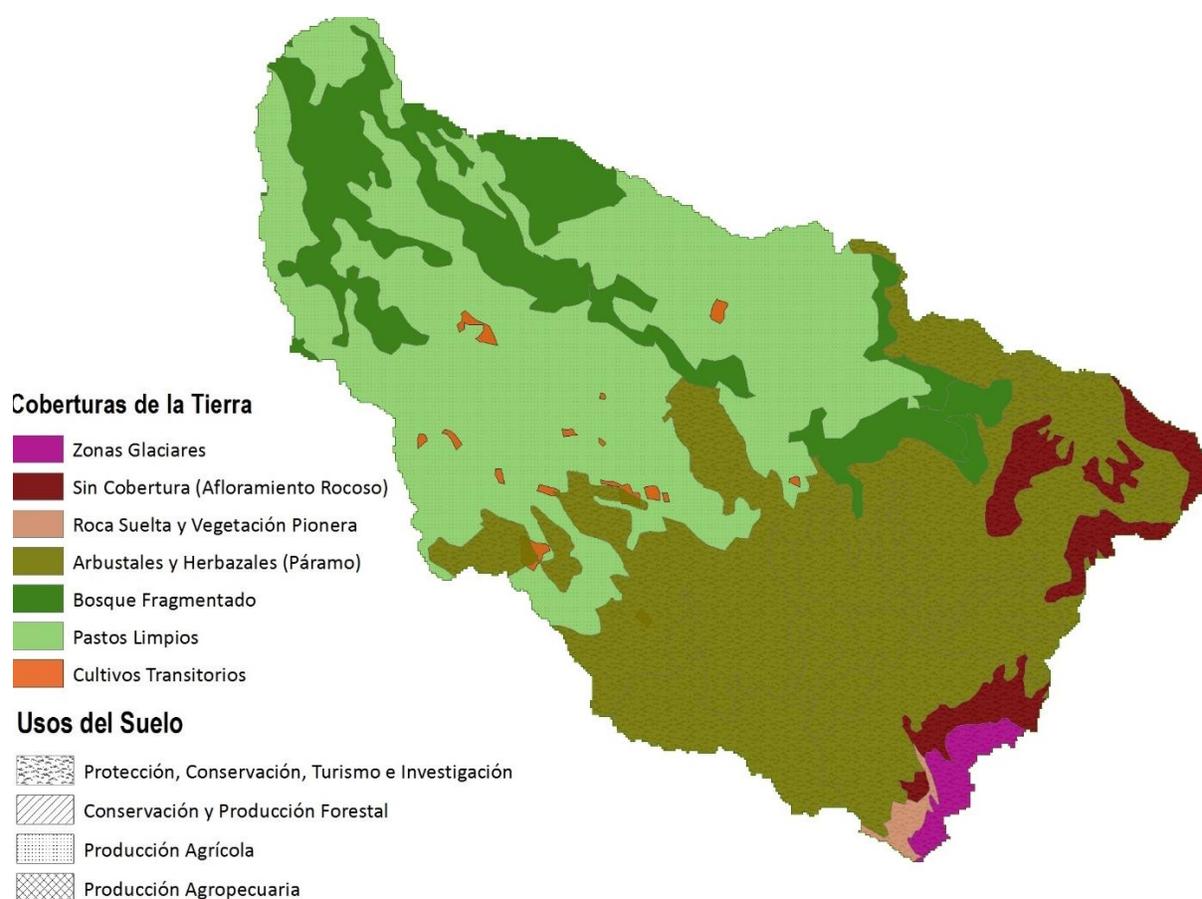


Figura 13. Coberturas y usos del suelo de la cuenca media alta de Río Claro. Fuente: Modificado de (Prieto, 2008)

En cuanto a los usos del suelo predominan tres importantes usos: protección investigación y turismo en la parte alta de la cuenca donde se encuentran el ecosistema páramo y los pisos geomorfológicos glacial y Periglacial; protección y producción de leña en la parte media y baja de la cuenca, donde se localizan los relictos de bosque Altoandino y producción

ganadera y agropecuaria en la mayor parte de la cuenca en cercanías a los relictos del bosque Altoandino y el ecosistema páramo (ver tabla 2) (figura 13) (Prieto, 2008). La parte alta de la cuenca hace parte de la jurisdicción de PNN Los nevados. Esta entidad tiene la obligación velar y controlar su uso, acceso y conservación. Por ser parte de un Parque Nacional Natural, sus usos están restringidos a la investigación, la protección y el turismo, Metros más abajo predomina el ecosistema Páramo, los usos del suelo están enmarcados en la conservación, dado su gran valor biológico, paisajístico y como regulador del recurso hídrico. Esta zona presenta buenos niveles de conservación, pese a que durante épocas pasadas fue escenario de fuertes actividades antrópicas (Prieto, 2008). En la actualidad, esta zona cuyo principal uso es la conservación, investigación y turismo tiene un área total de 32km² representado en el 45,5% total del área total de la cuenca.

Desde los 3900 m hacia abajo, el principal uso del suelo es productivo, siendo las principales actividades la ganadería y la agricultura; conjuntamente existen relictos de bosque Altoandino, que además de ayudar a preservar el recurso hídrico, sirve como abastecedor de leña para las comunidades campesinas que habitan en la cuenca. La agricultura está enfocada en el cultivo de papa de diferentes variedades (fina y parda, argentina, salentina y pastusa), los cuales se encuentran en un rango altitudinal que va desde los 3900 hasta 2700m con un área de 0,49 km² que representa el 0,7% de la cuenca. En la vereda Páramo la mayoría de los cultivos no sobrepasan una hectárea y en la vereda Potosí, el promedio de área cultivada es de 4-5 ha. Sin embargo, existe un predio donde se siembran hasta 10 has. Esta actividad productiva ha generado fuertes impactos en el suelo y el recurso hídrico, siendo la principal causa la contaminación por el uso de fertilizantes químicos y la erosión del suelo por formación de terracetas. Los lotes donde se realizan los cultivos se dejan descansar por periodos de 2 a 3 años en pasturas para ganado. La producción recogida se comercializa en Manizales (94%) y/o Villamaría (6%) (CORPOCALDAS & CI, 2005).

Por otra parte, la ganadería extensiva se practica en su mayoría con ganado de raza Normando y Holstein y está destinado a la producción lechera, en mayor medida, y de doble propósito en menor medida. El manejo de esta actividad se limita al sobrepastoreo, cambios de potreros y suministro de sal. La vereda Páramo alberga alrededor de 3000 reses y la vereda Potosí 1500. Se calcula que el promedio de producción es de 6 litros de leche diarios por vaca. Esta

leche, recogida por un carro tanque día de por medio, es llevada a los tanques enfriadores que queda a los 2800 m siguiendo la vía a Villamaría (Finca la Zulia). Toda esta producción de leche es vendida a la empresa Alpina. Esta fuerte actividad ganadera realizada en un área de 27,5 km², 39% total de la cuenca ha generado la degradación de la estructura y funcionamiento del suelo, contaminación del recurso hídrico resultado del vertimiento del agua hervidas y la falta de plantas de tratamiento. Conjuntamente, los humedales han sufrido un fuerte impacto ambiental, por la sedimentación y desecación inducida por parte de las comunidades campesinas con el objetivo de construir drenajes en busca de ampliar la superficie disponible para el establecimiento de cultivos y potreros de ganado (CORPOCALDAS & CI, 2005). En lo que se refiere al aprovechamiento forestal, CORPOCALDAS & CI (2005) sustenta que el material vegetal utilizado como leña para la cocción de alimentos y calefacción del hogar es extraído en un 77% de los bosques cercanos a las viviendas y el 23% de los potreros que disponen de ramas secas de árboles y arbustos caídos. El promedio de extracción semanal de leña asciende a una carga (dos bultos) por vivienda. De esta manera, se puede considerar que las áreas donde se desarrollan dichas actividades de producción son las más transformadas y vulnerables, ocupando un total de 10.4 Km², este alto grado de intervención corresponde al 14.7% del área total analizada.

El conocimiento de las condiciones económicas y las formas de ocupación y uso de los recursos naturales en la cuenca del río Claro, se constituyen en variables indispensable a la hora de analizar los impactos y vulnerabilidades asociadas al cambio climático. Conocer cómo se distribuyen y usan los recursos en un determinado tiempo y espacio, permiten entender la dinámica y relaciones que se entretajan entre las sociedades humanas y los factores biofísicos y con ello, vislumbrar los grados de fragilidad de cada sistema, aportando a la definición de opciones de adaptación acordes a las necesidades y dinámicas productivas. Esto se complementa con lo planteado por el IDEAM (2011), quien señala que son los actores locales los que deben apropiarse y ser conscientes de las necesidades de adaptarse y adaptar el territorio frente a las posibles condiciones que albergará el cambio climático. Para el caso específico de la cuenca de estudio, estimamos que existen precarias condiciones de vida en los habitantes de la zona, reflejado en el déficit en la prestación de servicios tanto sociales como públicos, generando que la población que habita la cuenca sea mayoritariamente foránea y flotante. Ello se constituye en una gran problemática, dado que las comunidades

que habitan la zona y sus propietarios muestran un desconocimiento de los impactos que está viviendo la alta montaña, lo que repercute a su vez en un desinterés en la implementación de prácticas productivas sostenibles e iniciativas enfocadas en la gestión ambiental y adaptación al cambio climático. Estudios como el realizado por Prieto, (2008) señalan que de 17 familias encuestas en la cuenca solo 6 (35%) reconocen los impactos que esta sufriendo la alta montaña a causa del cambio global. Conjuntamente y a consecuencia de la frágil institucionalidad y la inexistente gestión ambiental, las practicas de subsistencia y productivas, enfocadas en la ganaderia, agricultura y aprovechamiento forestal estan generando fuertes impactos en los ecosistemas y el recurso hídrico en la parte media baja de la cuenca, siendo el bosque Altoandino el principal afectado.

Diversas investigaciones han analizado los impactos que tendría el cambio climático en la alta montaña colombiana, encontrando que se producirá un aumento en los procesos de erosión, el deslizamiento de tierras en las laderas más empinadas y los bosques de niebla. Las epifitas y biotas características de este ecosistema se verán impactadas por la disminución de la humedad. El páramo y superpáramo podrían reducirse o fragmentarse y, con el calentamiento de sus bordes más bajos se convertirían en terrenos más adecuados para la agricultura, quedando expuestos a incendios antropogénicos (Herzog, et al, 2010). Asimismo, se estima que para el año 2050 habrá desaparecido el 80% del área glaciar del país y el 60% del área de páramos estará altamente degradada, afectando a la oferta hídrica de importantes ciudades y centros poblados a nivel nacional (IDEAM, 2010).

De acuerdo con lo anterior, de no tomarse medidas inmediatas, los impactos del cambio climático sumado a las actividades antrópicas que se realizan en la actualidad, podrían generar grandes afectaciones en la alta montaña y especialmente en el bosque Altoandino y el páramo, ecosistemas de vital importancia para el bienestar humano y el equilibrio ecológico dada su importancia en el ciclo hidrológico como reservorio y regulador y su alta diversidad biológica (FAO, 2002). De acuerdo con lo planteado por el IPCC (2001), la vulnerabilidad al cambio climático sera mayor en los sistemas hidricos mal administrados, que se encuentran bajo tensión o cuya ordenación es deficiente e insostenible, debido a que las politicas desalientan el uso eficiente del recurso, la protección de la calidad de agua y la inadecuada ordenación de las cuencas hidrograficas. En este sentido, es indispensable promover

iniciativas en la cuenca alta del río Claro y a escala nacional que conlleven a la identificación de las responsabilidades institucionales, actores locales, necesidades de las comunidades, percepciones frente al cambio climático y el recurso hídrico para coordinar acciones y directrices que contribuyan a una eficiente gestión ambiental y por ende una gestión al cambio climático. En conclusión, es preciso señalar que la eficiente gestión al cambio climático estará sujeta al papel de los diversos niveles de gobierno, es decir a la institucionalidad pública y el tipo de políticas que se generen para la gestión y consolidación tanto de un desarrollo sustentable como un desarrollo “climáticamente inteligente”; al papel de las organizaciones locales (instituciones públicas, actores privados y mixtos) y el nivel de coordinación que se pueda construir con las instituciones públicas. Estas organizaciones deben apoyar la interacción entre los agentes, la creación de nuevas instituciones vinculantes e instrumentos para que los diversos actores de un territorio desarrollen una capacidad de adaptación constante a los cambios continuos del medio biofísico, las tecnologías y los mercados, buscando la sustentabilidad de los recursos naturales y resiliencia de los ecosistemas.

8.3. Caracterización de la dinámica glaciar y la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Claro.

8.3.1. *Dinámica glaciar y su relación con el clima*

Los glaciares de la zona ecuatorial han sido catalogados como idóneos indicadores de cambio climático por su fiel y rápida respuesta a los cambios en la temperatura y precipitación. La conservación del aire y partículas de polen en su interior, han permitido a la comunidad científica analizar el clima en tiempos pasados. Estos excepcionales sistemas desempeñan un importante rol local en el sistema climático e hidrológico, ya que regulan la temperatura en espacios como el páramo y actúan como aportantes de agua dulce a dichos ecosistemas durante las temporadas secas por medio de la fusión glaciar, propiciando el mantenimiento de cuerpos y cursos de agua primordiales dentro de la ecología de especies animales, vegetales y del ser humano (IDEAM, 2012). En consecuencia, la observación de su dinámica forma parte importante en la línea científica de base para la adaptación al cambio climático en ecosistemas de alta montaña. El presente acápite analiza la dinámica del volcán nevado Santa Isabel ubicado en la cuenca del río claro a partir de los datos suministrados por el IDEAM y los tres procedimientos básicos recomendados a nivel internacional para su

estudio: 1. Cálculo periódico del área glaciario, 2. Medidas de retroceso del frente glaciario y cálculo del balance de masa glaciológico. Esto complementado a su vez, con un análisis estadístico Multivariante cuyo fin se centra en estudiar en qué medida un conjunto de variables independientes (precipitación, temperatura, e índices ENSO) pueden explicar la variabilidad del balance de masa del glaciario, para así lograr comprender su relación con el clima. El análisis de la dinámica del glaciario “volcán nevado Santa Isabel” inició con el estudio de los cambios en la superficie. El cálculo de áreas se realiza con base en interpretación de fotografías aéreas o imágenes de satélite (Landsat y Sentinel), y su correspondiente proceso fotogramétrico o procesamiento digital, el cual consiste en la georreferenciación de las imágenes. Para el estudio de las nieves se utilizan las bandas azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y la termal. Todas las imágenes deben tener la misma resolución (generalmente 10 metros) en caso de que alguna banda tenga una resolución diferente se debe re proyectar. Se unifican las bandas anteriormente mencionadas y se aplica la combinación de bandas (5-4-3) para facilitar la visualización del área glaciario, posteriormente se deben dividir la banda 3 y 5 obteniendo un resultado muy cercano del área glaciario. A continuación, se verifican manualmente los resultados obtenidos por medio de la interpretación visual de acuerdo a lo observado en la imagen satelital. El proceso fotogramétrico y procesamiento digital se genera en el software ERDAS IMAGINE y la interpretación visual, trazado de los polígonos y análisis estadísticos en el software ArcGIS. A continuación, se presentan los datos históricos (tabla 3, figura 14)

Tabla 3. Evolución del área glaciario, volcán nevado Santa Isabel periodo de 1850-2014

Año	Área Glaciario Km²	Método implementado	Imagen Utilizada
1850	27,8	Interpretación Visual	Imagen aérea
1946	10,8	Interpretación Visual	Imagen aérea
1959	9,4	Interpretación Visual	Imagen aérea
1987	6,4	Interpretación Visual	Imagen aérea
1996	5,3	Interpretación Visual	Imagen satelital
2002	3,33	Interpretación Visual	Imagen satelital
2007	2,6	Interpretación Visual	Imagen satelital
2010	1,8	Interpretación Visual	Imagen satelital
2014	1,14	Interpretación Visual	Imagen satelital

Fuente: (IDEAM, 2014)

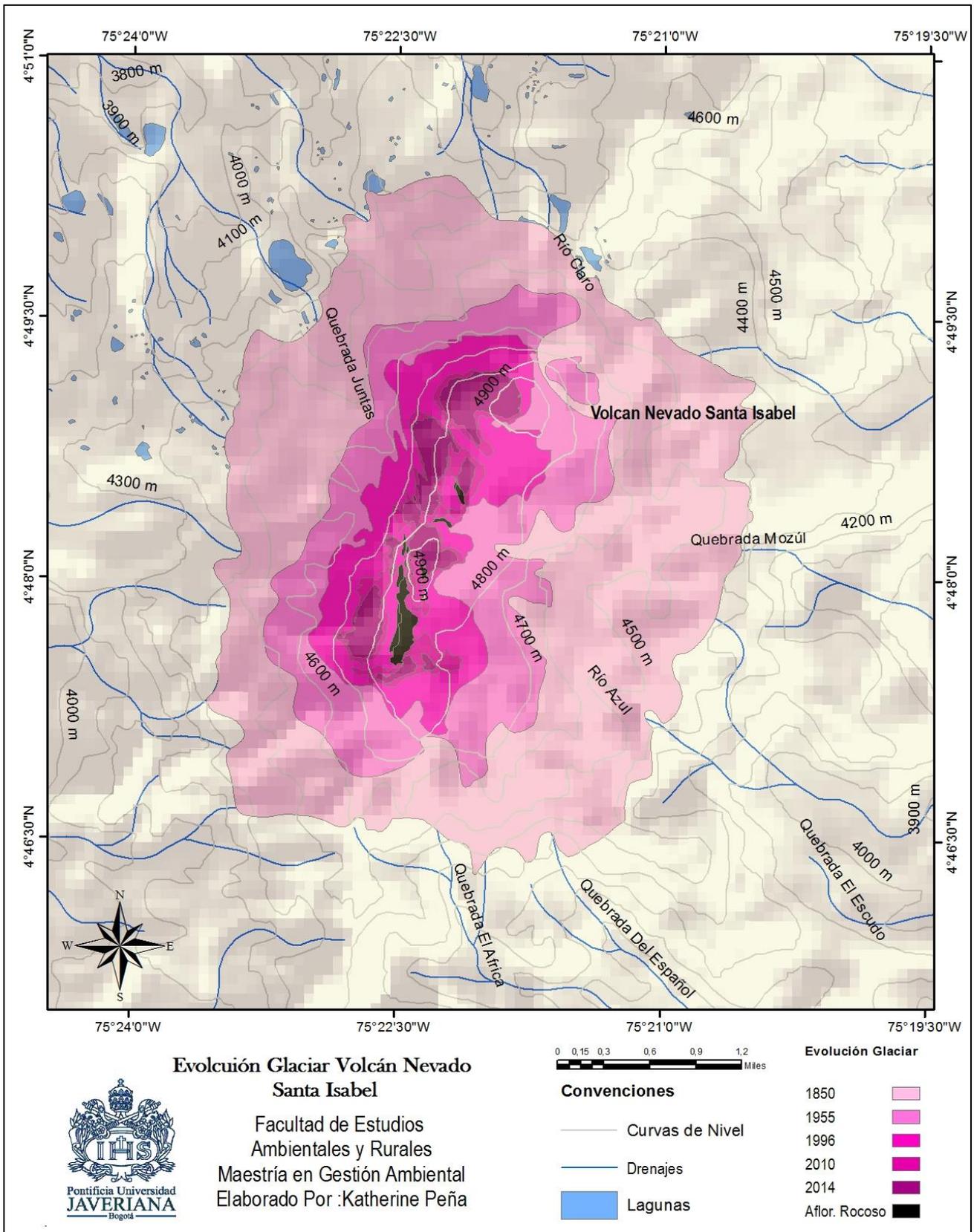


Figura 14. Evolución glaciar volcán Nevado Santa Isabel. Elaboración de los autores Fuente de los datos: IDEAM, 2014.

La tabla 3 figura 14 presentan la evolución del volcán nevado Santa Isabel en los últimos dos siglos. Desde el 1850 esta importante masa de hielo ha perdido el 96% de su masa glaciar y en los últimos 30 años un 82%, con una tasa de derretimiento anual del 7%. De continuar las actuales condiciones climáticas se espera que en el transcurso de las próximas décadas el glaciar desaparezca (IDEAM, 2012). Adicional al estudio de la superficie, el Instituto Agustín Codazzi (IGAC) junto con el IDEAM, han documentado el retroceso del frente glaciar. Para el caso del volcán nevado de San Isabel se cuenta con nueve puntos de medición los cuales se monitorean desde el año 1988. La tabla 4 presenta de manera general los puntos de estudio y los valores de retroceso del frente glaciar, donde se puede observar que el glaciar volcán nevado Santa Isabel durante el periodo de 1988 a 2015, tiene una tasa de retroceso anual de 22.8m.

Tabla 4. Retroceso del frente glaciar periodo de 1988-2016

Número del Punto N°	Periodo de medición	Nombre del punto de medición del retroceso glaciar	Retroceso Promedio histórico (m) 1988-2015
1	1991-2011	SI 4izq	17,95
2	2001-2015	SI-N	23,44
3	2001-2010	SI-Norte	21,43
4	2006-2011	SI-8 Norte	15,25
5	1989-2014	SI-8	23,20
6	1988-2011	SI-2	21,03
7	2003-2006	SI-PNE	15,33
8	2003-2014	SI-Este	40,82
9	2003-2008	SI-Sur	26,98
Promedio retroceso glaciar anual (m)			22.8 m

Fuente: IDEAM, 2014

Otro de los métodos ampliamente utilizados en la academia para estudiar la dinámica glaciar, es el Balance de Masa Glaciológico el cual se constituye en una de los indicadores más importantes del estado de un glaciar y representa las ganancias o pérdidas de una masa de hielo durante un determinado periodo de tiempo. En el glaciar Conejeras ubicado en el volcán nevado Santa Isabel, se utiliza una metodología estándar a nivel internacional que consiste en instalar un conjunto de estacas en la superficie del glaciar a máximo 5 metros de profundidad, para medir periódicamente cómo cambia la superficie del glaciar. La unidad de

medida es milímetros equivalentes de agua (mm e.a) o metros equivalentes de agua (m. e.a). Un valor positivo indica ganancia de masa, un valor negativo pérdidas de masa. El glaciar Conejeras tiene actualmente 11 balizas o estacas distribuidas en conjunto de tres cada 50 metros de altitud. Mensualmente se realizan mediciones de la emergencia de las estacas y con los valores obtenidos directamente en campo se calcula el balance de masa mensual, anual, acumulado, el gradiente altitudinal del balance de masa y la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés), que corresponde a la altitud en que el balance de masa es igual a cero (IDEAM, 2012). La tabla 5 presenta los datos del balance de masa anual, el acumulado, el gradiente altitudinal del balance de masa y la ELA del glaciar Conejeras.

Tabla 5. Datos Balance de masa anual del glaciar Conejeras volcán nevado Santa Isabel 2006-2016

Año	Balance de masa mm e.a.	Balance de masa acumulado mm e.a.	Gradiente altitudinal del balance de masa mm e.a 100m-1	ELA Anual (m)
2006	-2199	-2199	216	4861
2007	-1974	-4173	84	4855
2008	-500	-4673	43	4795
2009	-3094	-7767	225	4872
2010	-3592	-11359	87	4933
2011	-798	-12157	132	4812
2012	-2149	-14306	130	4888
2013	-3802	-18108	180	4909
2014	-3714	-21822	153	4951
2015	-5908	-27730	188	4999
2016	-4524	-32254	141	4848

Fuente: (IDEAM, 2016)

La tabla 5 figura 15 muestran los datos calculados en una década de observaciones mensuales en el glaciar conejeras ubicado en el volcán nevado Santa Isabel. En términos glaciológicos este glaciar presenta un balance de masa acumulado negativo de 32 metros equivalentes de agua, valor que se considera muy alto en comparación con otros glaciares del planeta (IDEAM, 2016). Así mismo, todos los valores del balance de masa anual son negativos, lo que indica que el glaciar en los 10 años de estudio ha estado un proceso de ablación constante (pérdida de masa de hielo y nieve). El balance de masa, al igual que la temperatura y las precipitaciones en la cuenca del río Claro, exhibe una fuerte influencia por el fenómeno climático ENSO. Por ejemplo, en el año 2011, periodo caracterizado por la influencia de “La Niña” el balance de masa fue de -798 mm.ea, valor relativamente bajo con respecto al promedio histórico (-2932 mm. ea), contrario a los años 2015 y 2016 (periodos influenciados

por “El Niño”) cuyos valores negativos corresponden a los más altos de la serie histórica. El año 2010, como se observa en la gráfica 21 presentó una desviación estándar muy alta, con valores máximos y mínimos extremos, lo cual puede explicarse porque el primer trimestre del año estuvo influenciado por el fenómeno climático “El Niño” y el último trimestre del año por el fenómeno climático extremo “La Niña”.

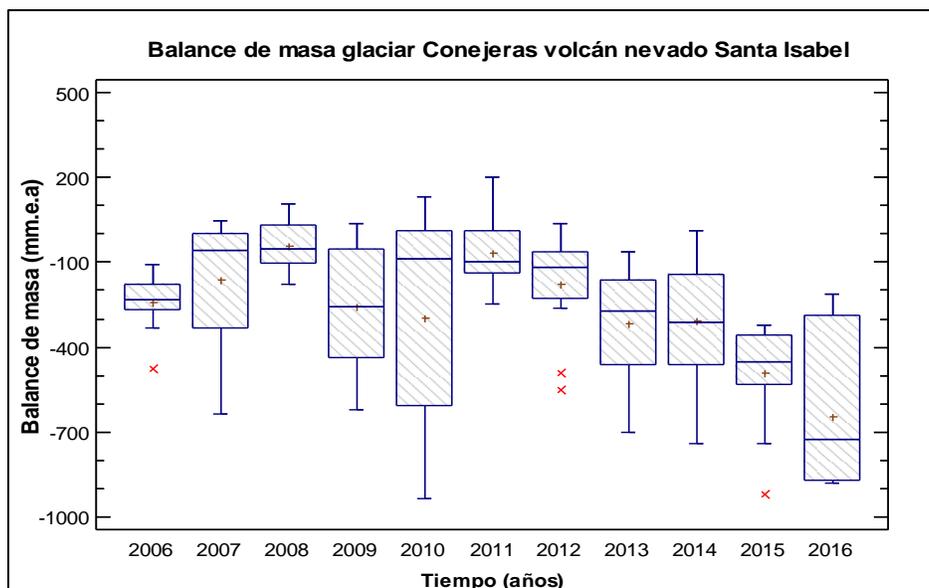


Figura 15. Balance de masa anual glaciar Conejeras volcán nevado Santa Isabel. El gráfico ilustra la mediana (línea), el rango intercuartílico (caja), la media (cruz), y los percentiles 10 y 90 (bigotes) de las distribuciones de frecuencias del balance de masa de cada año. Fuente: elaboración de los autores Fuente de los datos: IDEAM 2016

Por otra parte, la línea de equilibrio (ELA) es un dato de altitud (metros) y se calcula matemáticamente con los datos del balance de masa. La ELA es dinámica: asciende en meses secos y desciende en meses de lluvia. El área glaciar por debajo de la ELA tiende a derretirse el área glaciar por encima de la ELA tiende a conservarse (IDEAM, 2016). La ELA en el glaciar Conejeras para el año 2006 se ubicaba en 4861 metros y para el año 2015 en 4999 metros, (la cumbre del glaciar está a 4900 m.), lo que indica que todo el glaciar estuvo en estado de ablación durante ese año y que, durante los últimos 10 años de observación la ELA ha ascendido 138 metros. Cabe aclarar, que la escasa a nula precipitación de nieve observada desde mediados del año 2012, ha sido una de las causas más importantes del fuerte derretimiento que ha vivido el volcán nevado Santa Isabel durante los años 2013 a 2016. La Figura 16 muestra esta situación (IDEAM, 2016).

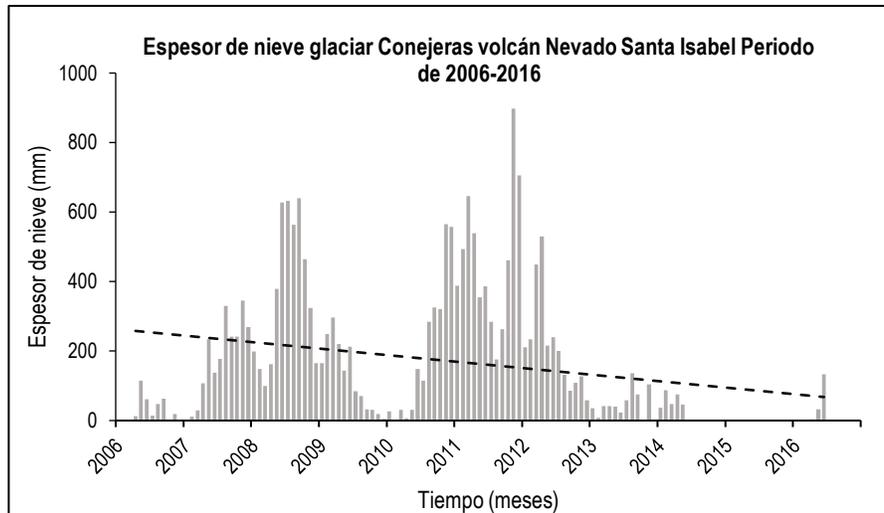


Figura 16. Espesor de nieve volcán nevado santa Isabel. Fuente: IDEAM, 2016

Los resultados anteriormente descritos evidencian un acelerado derretimiento del glaciar. Según el IDEAM (2016), El intenso derretimiento tiene su explicación en una menor nubosidad lo que ha ocasionado una disminución de precipitación sólida (nieve), componente natural fundamental para la “supervivencia” de un glaciar, dado que aporta la materia prima de construcción glaciar, a su vez que constituye una superficie de gran nivel de reflexión de radiación solar (albedo), contribuyendo a mantener el equilibrio radiativo del glaciar. Asimismo, la menor nubosidad aumenta la exposición de la superficie glaciar a los diferentes tipos de radiación solar, aumentando así el derretimiento. A esta situación se suma la ceniza volcánica que está dispersa sobre el glaciar lo que incrementa aún más la fusión del hielo, al absorber mayor cantidad de radiación solar que la superficie nevada (disminuyendo el albedo). En conjunto, la falta de cobertura de nieve, el hielo expuesto y la presencia de ceniza han disminuido fuertemente el albedo del glaciar (porcentaje de radiación que una superficie refleja) lo que se traduce en que el glaciar absorbe mayor cantidad de energía y la utiliza para derretirse. Esta variable ambiental es una de las que más controla la fusión glaciar (a menor albedo mayor fusión y viceversa).

De acuerdo con lo anterior y en aras de comprender la relación entre el clima y el glaciar, se realizó una regresión multivariante, para comprender en qué medida un conjunto de variables independientes (precipitación, temperatura y el ONI Enso Index –ONI–) podrían explicar la variabilidad del balance de masa. Así mismo con la ecuación producto del modelo estadístico y los datos de precipitación temperatura y el ONI, se reconstruyó el balance de masa desde

el año 1982 a mayo de 2006. Cabe señalar que antes de aplicar el modelo se realizó un análisis espectral de las series de datos históricas de temperatura, precipitación, ENSO (ONI) y balance de masa, para para detectar los ciclos que mayor parte de varianza explican en cada una de las variables, así como su posible relación (figura 17). Cabe señalar a pesar que el albedo es una de las variables más importantes en el estudio de la dinámica glaciar, para el presente estudio no fue posible su inclusión en el modelo dado que la serie de datos disponibles presentaba regular calidad, con gran cantidad de datos ausentes y atípicos.

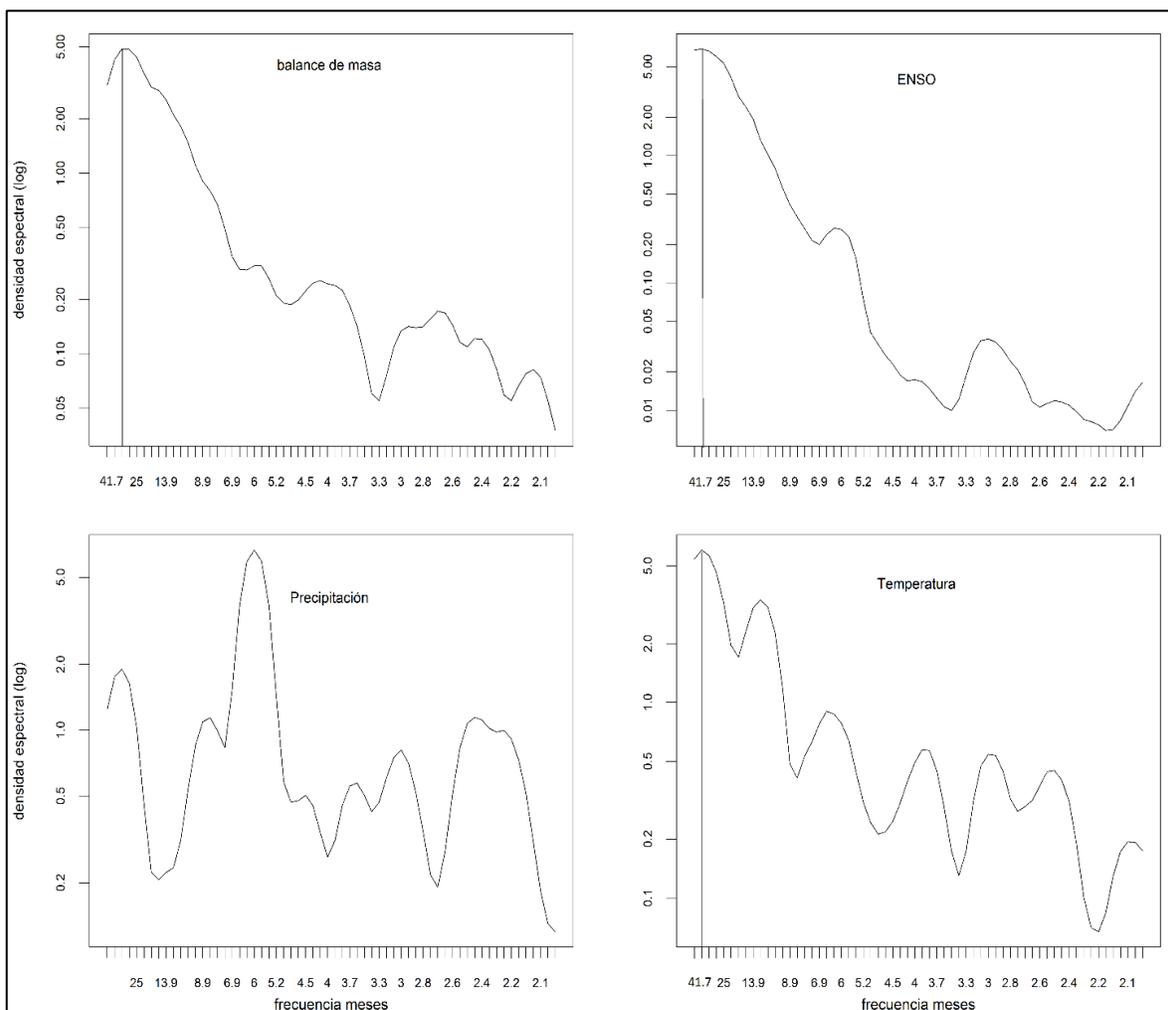


Figura 17. Análisis espectral de las series de datos del balance de masa, el ENSO, precipitación y temperatura.

La figura 17 muestra los resultados del análisis espectral en donde se observa una clara relación entre las distribuciones del balance de masa y el ENSO (ONI), los cuales presentan su máxima densidad espectral en la frecuencia de 42 meses, que coincide con la periodicidad con las que se presentan los eventos climáticos ENSO (entre 3 a 4 años) (Viles & Goudie,

2003). Así mismo en el balance de masa, el ENSO y más acentuado en la precipitación, se denota un pico en la frecuencia correspondiente a los 6 meses, que se podría explicar por el régimen bimodal que gobierna gran parte de la región andina. Las temperaturas a pesar de no exhibir un comportamiento claro, denotan una mayor densidad espectral en la frecuencia de 42 meses, posiblemente influenciadas por la ocurrencia del fenómeno climático ENSO. Una vez se realizó el análisis espectral y se comprobó la relación entre cada una de las variables se procedió a diseñar y procesar la información con el modelo multivariante. En la figura 18 se aprecia una evolución simétrica del balance de masa y el ONI, de tal forma que cuando el ONI presenta sus valores más altos (fases Niño), el glaciar experimenta mayores retrocesos, y viceversa. También se observa una relación parecida con las temperaturas, y en cuanto a las precipitaciones, no parece existir una relación a simple vista. Para computar numéricamente estas relaciones, se ha desarrollado un modelo de regresión lineal múltiple en el que el balance de masa, como variable dependiente, va a ser modelizado en función del ONI, las temperaturas, y las precipitaciones, como variables independientes (tabla 6)

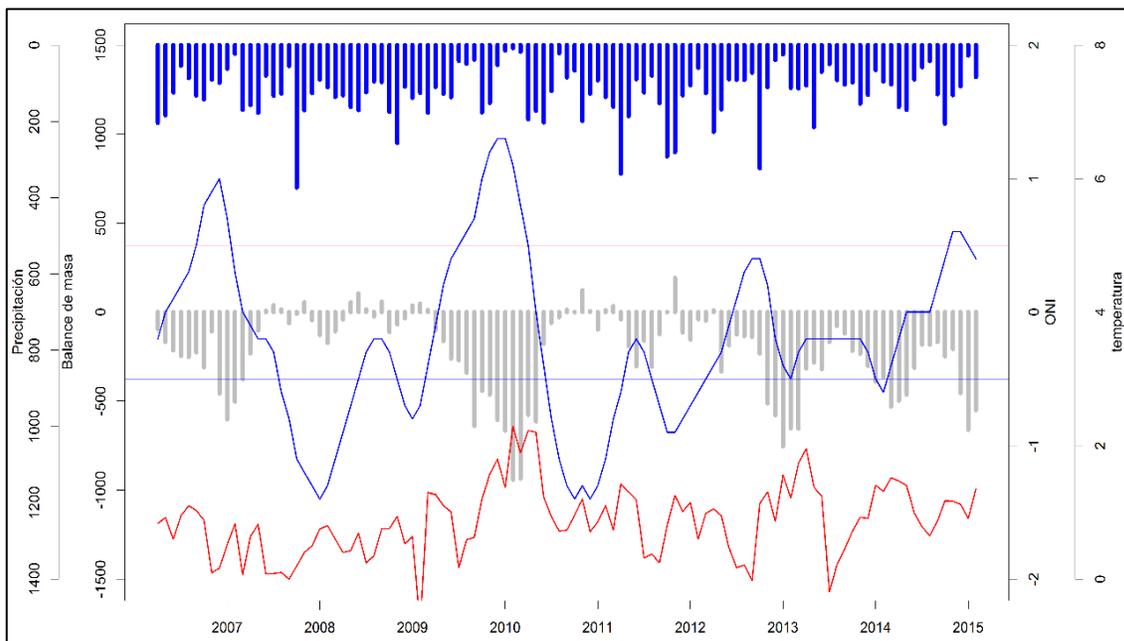


Figura 18. Evolución de las variables independientes (temperatura, ONI y Precipitación) y el balance de masa

Las variables se han introducido en el modelo “paso a paso”, y su participación como variables explicativas se ha evaluado mediante un análisis de varianza ANOVA. Los resultados muestran que la variable que más explica el balance de masa es el índice del

fenómeno ENSO “ONI”, seguido de la precipitación y la temperatura con un 95% de confianza.

Tabla 6. Evolución de las variables independientes (temperatura, precipitación y ONI) y el balance de masa.

Variab les	C oeficiente	E rror estándar	P -valor
(Intercept)	198.4	210.5	0.943
ONI	-121.93	24.37	2.330e-06***
Temperatura	-112.34	43.08	0.01048*
Precipitación	0.854	0.255	0.00112**

*Fuente: Elaborado por los autores. Lo valores con * indican que son estadísticamente significativos con un 95% de confianza, ** y *** estadísticamente significativos con un 99 % confianza. R² del modelo = 0.48*

Este modelo compuesto por tres variables independientes (temperatura, precipitación y ONI), explica la variabilidad del balance de masa del glaciar Conejeras en un 48% con un 95% de confianza; la varianza residual, es decir, el porcentaje no explicado por el modelo puede deberse en gran medida al papel del albedo, que, a través de la nubosidad, los niveles de ceniza, o la superficie de nieve fresca sobre el glaciar, puede afectar en gran medida al balance de masa. La ecuación del modelo y con la cual fue posible reconstruirlo se presente a continuación:

$$Bm = 198.4 - 121.9 \cdot oni - 112.3 \cdot temp + 0.85 \cdot p$$

La figura 19 compara la evolución del balance de masa observado, con los valores obtenidos de aplicar la ecuación arriba mencionada. El balance simulado se ajusta a los ciclos principales de variabilidad inter-anual del observado (condicionados principalmente por el fenómeno ENSO), sin embargo, es menos preciso a la hora de reproducir la variabilidad a escala intra-anual, que podría estar más relacionada con las variaciones mensuales en el albedo superficial del glaciar, en relación a la cubierta de nieve o a la cantidad de ceniza volcánica en superficie. Podemos por lo tanto concluir que el modelo producido es válido para simular la variabilidad interanual del balance de masa, pero no para un mayor nivel de detalle, como puede ser la escala mensual.

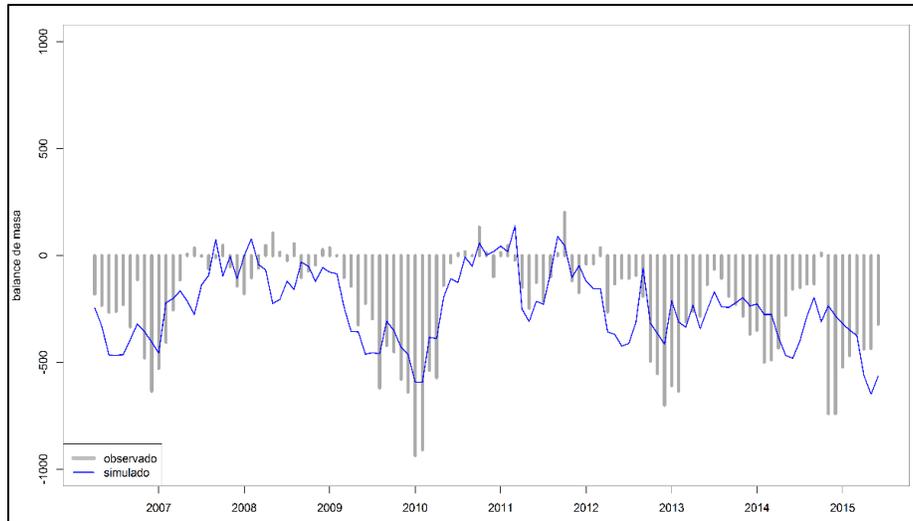


Figura 19 Reconstrucción balance de masa glaciar conejeras volcán nevado Santa Isabel, periodo de 2006-2016

Gracias a la existencia de series del ONI, precipitación y temperatura desde los años 60, podemos realizar una reconstrucción del balance de masa hacia décadas pasadas (Figura 20). Por lo mostrado anteriormente, debemos que tener en cuenta que dicha reconstrucción puede ser válida para la variabilidad a gran escala, pero no para la escala de detalle. Según este modelo, el glaciar viene experimentando un retroceso (balance de masa negativo) similar al observado en la actualidad, durante las últimas cinco décadas, si bien con picos menos acentuados que los registrados durante la última década y periodos de recuperación más acentuados que en la actualidad, coincidentes con los eventos “Niña”, y con unas temperaturas que eran, por lo general, más bajas que en la actualidad.

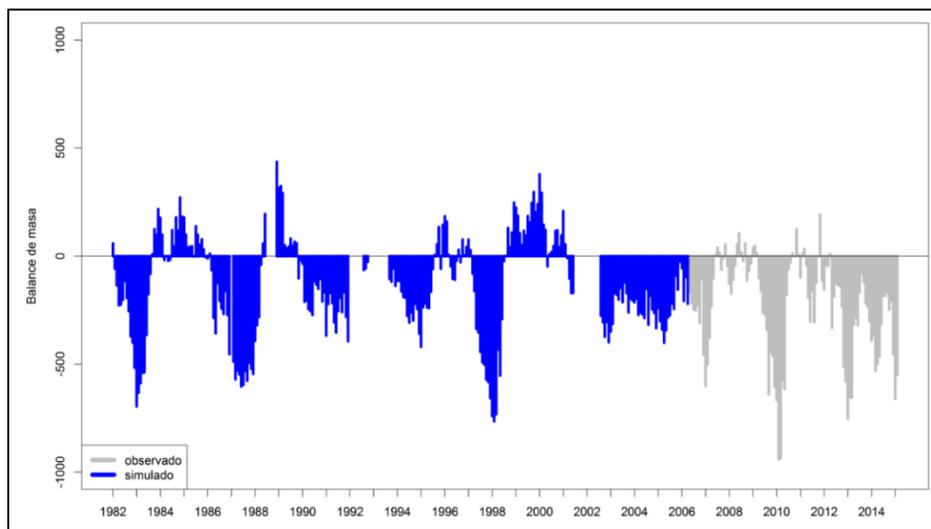


Figura 20. Reconstrucción del balance de masa del glaciar Conejeras volcán nevado Santa Isabel, periodo de 1982-2016. Los valores ausentes durante los años 1988 y 1992-93, se deben lagunas de datos en las variables independientes precipitación y temperatura

Los resultados anteriormente descritos indican una disminución acelerada del volumen, área y espesor del volcán nevado Santa Isabel, que concuerda con el IPCC, (1990,1995,2001, 2007, 2014) que expresa que todos los glaciares a nivel mundial han continuado menguando su masa glaciaria y nival, en promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios. Conjuntamente mediciones realizadas por el Programa GREATICE y sus contrapartes muestran que en todos los glaciares tropicales monitoreados el comportamiento es similar, donde se observa un quiebre significativo en su evolución desde mediados de los años 70 (Ramírez E. , 2008). Por otra parte, Poveda & Pineda (2009), señalan que los glaciares colombianos retroceden en promedio de 2 a 3 km por año y particularmente el volcán nevado Santa Isabel perdió un 49% de su superficie de hielo entre 1989-2007. Por otra parte, Flórez (2002, 1992) expresa que para los años 1600 y 1850 Colombia tenía aproximadamente 374 km² de área glaciaria, con elevaciones mínimas entre 4200-4400 msnm en los andes centrales y 4600 msnm en la Sierra Nevada de Santa Marta, ocho glaciares desaparecieron en Colombia durante el siglo XX, y muchos otros perdieron la extensión de su área en un porcentaje de 60% a 80%. El MRI (2015) sugiere que los ambientes de alta elevación, que comprende los glaciares, la nieve, el permafrost, el agua y los límites superiores de la vegetación y otras formas de vida complejas se encuentran entre los sistemas sensibles a los cambios climáticos que ocurre a escala global.

El presente trabajo evidenció además, que una de las variables que afecta en mayor medida el balance de masa es el fenómeno climático ENSO, lo que concuerda con (Ramírez E. , 2008), quien expresa que de acuerdo con las observaciones, mediciones y estudios realizados en los glaciares tropicales, se ha constatado que un glaciar es sumamente vulnerable a las variaciones climáticas y la presencia de eventos climáticos importantes como los fenómenos Niño. Este último tiene consecuencias dramáticas sobre los balances de masa de los glaciares en los Andes en la región tropical manifestándose principalmente como un déficit de precipitación durante la época de lluvias que provoca a su vez una cobertura de nieve menos abundante e induce a una mayor radiación solar absorbida por los glaciares y consecuentemente un derretimiento más acentuado de los mismos. Investigaciones como la realizada por el MRI (2015) argumentan que entre 1958 a 1990, las condiciones glaciarias altitudinales de los Andes Tropicales estaban relacionadas con el fenómeno climático ENSO. Así mismo el IDEAM (2016), sustenta que para el periodo de influencia del fenómeno “El Niño” 2015-

2016 el glaciar Santa Isabel disminuyó el espesor en su superficie 7.6 metros, siendo la fase fuerte del fenómeno la que más afectó el glaciar, propiciando el derretimiento de 5 metros de su superficie glaciar, valor que se considera bastante alto con respecto al histórico (3 metros, 2006-2016), y al valor registrado durante el penúltimo fenómeno El Niño (2009-2010). En general, se estima que el glaciar Conejeras “perdió” 33% de su volumen durante este último fenómeno climático, y en los últimos dos años (enero de 2014 a abril de 2016) 62% con una disminución de su espesor de hielo de 14 metros.

De acuerdo con lo anterior, el volcán nevado de Santa Isabel, está viviendo fuertes procesos de ablación que podría generar su extinción en un futuro no muy lejano. Se estima que para el año 2050 habrá desaparecido el 80% del área glaciar del país y el 60% del área de páramos estará altamente degradada, afectando a la oferta hídrica de importantes ciudades a nivel nacional. Por el momento no es posible establecer la magnitud de esta afectación, puesto que no existen modelos del ciclo del agua para alta montaña que consideren adecuadamente el aporte del páramo, el bosque y el área glaciar (Posada 2007). Asimismo el IPCC (1990,1996, 2001, 2007, 2014), argumenta que en 100 años la tercera parte de la masa glaciar montañosa desaparecerá dadas las pérdidas de extensión generalizadas de los glaciares y las reducciones del permafrost y la capa de nieve de los últimos decenios, los cuales se acelerarían durante el siglo XXI. Esto generará un gran impacto a nivel global, puesto que a escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo desempeñan un papel crucial con respecto a la disponibilidad de agua dulce. En este sentido, el cambio climático podría afectar la escorrentía, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico, y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras, donde vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial y gran cantidad de biodiversidad endémica que cumplen funciones vitales para mantener el equilibrio natural (IPCC, 2013, Adam et al 2009).

8.3.2. *Análisis de la variabilidad hidroclimática*

Las precipitaciones y las temperaturas gobiernan en gran medida las condiciones hidrológicas y servicios ecosistémicos de los sistemas naturales, ya que se constituyen en fuente directa de los recursos hídricos al condicionar su disponibilidad y evolución. Actualmente existe un consenso en la comunidad científica sobre el gran impacto que está

generando el cambio global sobre el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas, el cual parece ser mayor en altitudes altas (alta montaña). No obstante, estudios hidrometeorológicos de la alta montaña y especialmente en los Andes tropicales son escasos, dada la ausencia de series largas de datos climáticos, lo que ha impedido la generación de análisis estadísticos robustos y con una buena resolución espacial (MRI, 2015, & Diaz, Grosjean, & Graumlich, 2003). Así pues, se hace imprescindible el estudio del clima en la alta montaña, como apoyo para la toma de decisiones frente a los retos que implica el cambio climático en ese importante sistema. En este sentido, el presente apartado presenta una caracterización de las variables hidrometeorológicas (temperatura y precipitación, los caudales serán analizados en el apartado 8.3) de la cuenca alta del río Claro en cada uno de sus ecosistemas y detalla las variaciones que han experimentado las temperatura y precipitación en el tiempo, así como las tendencias observadas a largo plazo.

8.3.2.1. Temperatura

Para la caracterización y análisis de las variaciones de la temperatura en la cuenca alta del río claro, se analizaron los datos de ocho estaciones climatológicas ubicadas a diferentes rangos altitudinales en el área de estudio. Para ello, se realizó la homogeneización de las series y el relleno datos ausentes. Cabe señalar que las series de temperatura presentaban regular calidad, reflejada en periodos de tiempo sin datos, datos atípicos y pocos años de registro (ver ejemplo en figura 21), lo que imposibilitó la generación de análisis estadísticos robustos en algunas de ellas. Sin embargo, fue posible realizar análisis exploratorios.

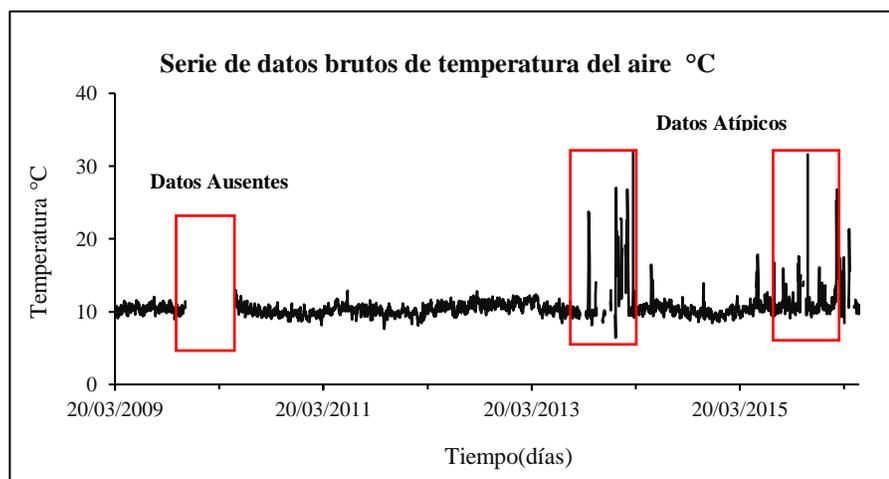
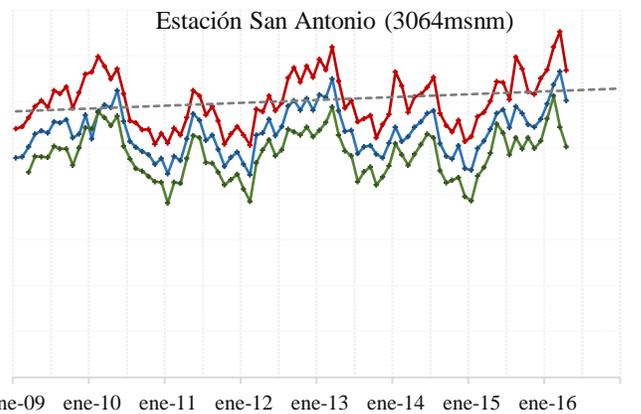
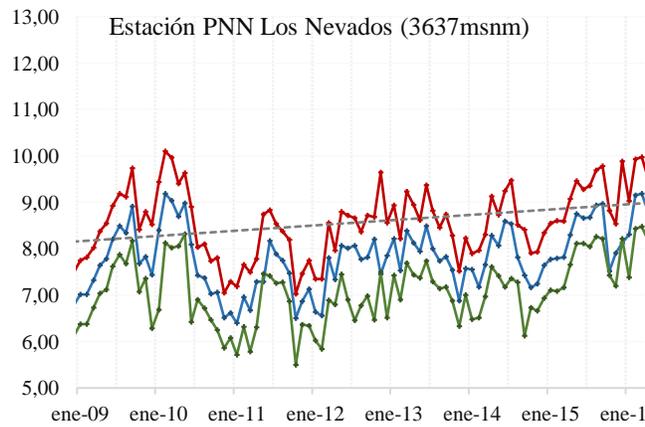
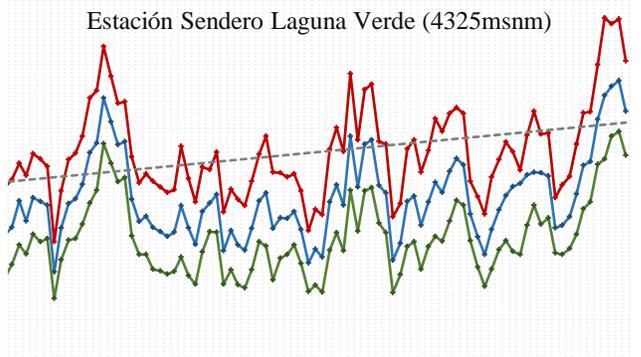
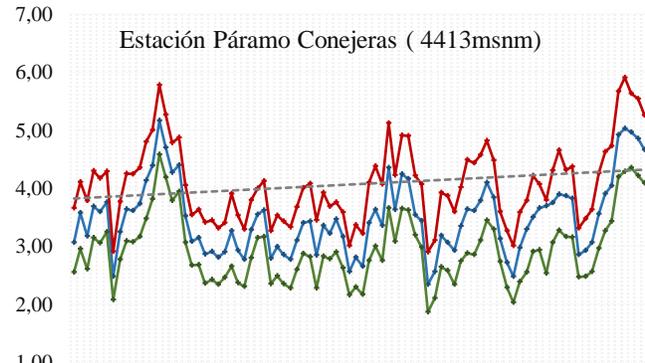
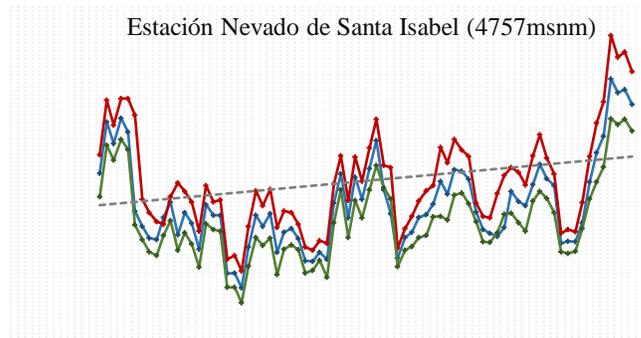
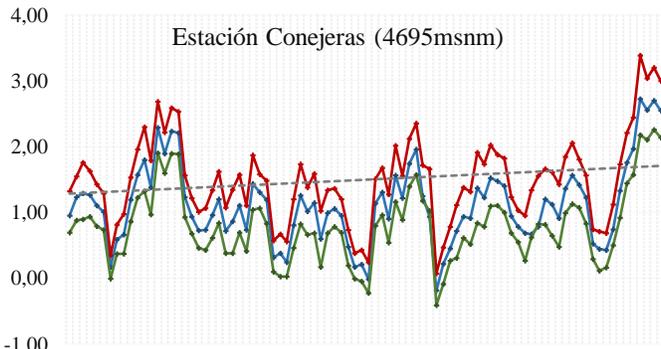
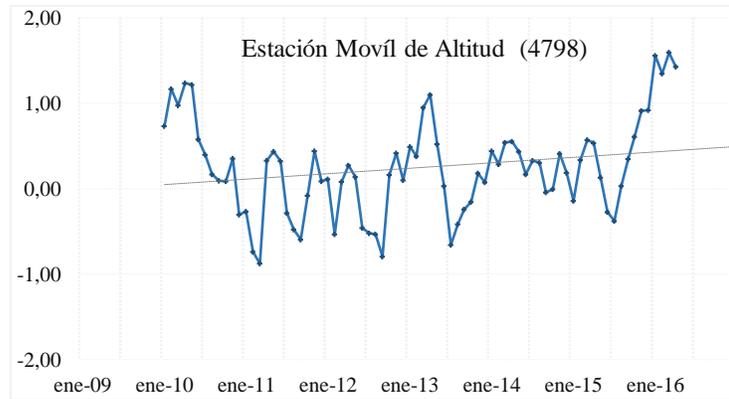


Figura 21. Series de datos temperatura media estación San Antonio fuente: Elaboración propia

La cuenca alta de río claro presenta un régimen de distribución de temperatura correspondiente a la región andina; los valores más bajos se registran en los meses de julio y agosto y los meses más cálidos son mayo y abril. En la parte alta de la cuenca (zona nival y Periglacial) las temperaturas medias mensuales oscilan entre -0.19 a 2.75 °C (promedio del periodo 2009-2016) y en el ecosistema páramo entre 2.34 a 5.16 °C. La parte media de la cuenca (Bosque Altoandino y zona intervenida) presenta registros de temperatura media mensual que fluctúan entre 6.39 a los 9.18 °C y la parte baja temperaturas de 9.41 a 11.16 °C. Este patrón de distribución espacial de las temperaturas responde a las características topográficas y orográficas de la zona.

La figura 22 presenta el comportamiento de las temperaturas máximas, medias y mínimas de las estaciones climáticas ubicadas en la zona de estudio para el periodo de enero de 2009 a mayo de 2016, donde es fácilmente observable una tendencia lineal hacia el aumento de las temperaturas y la fuerte influencia que fenómeno climático “El Niño”, cuyas fases extremas se observan durante el último trimestre de 2009 y el primer trimestre de 2010 y el último trimestre de 2015 y primero trimestre de 2016. Este análisis, se realizó además de manera individual, graficando las temperaturas y precipitaciones generados durante la fase fría “La Niña”, la fase cálida “El Niño” y la fase neutra, en boxplot. Se utilizó el Índice de ENSO ONI (por sus siglas en inglés), y se filtraron los valores de temperatura y precipitación de acuerdo a los datos del ONI. Los datos del fenómeno “La Niña” corresponden a los valores de ONI iguales o menores a -0.5 ; los de “El Niño” iguales o mayores a 0.5 y los de la fase neutra menores a 0.5 y -0.5 . La figura 23, ilustra como las temperaturas (y también las precipitaciones, que se comentarán posteriormente) se ven fuertemente afectadas por la influencia de los fenómenos climáticos entremos “La Niña” y “El Niño”. De forma general, los boxplots muestran que durante las fases “El Niño”, las temperaturas presentan valores más altos con respecto a la fase neutra. Caso contrario ocurre bajo la influencia del fenómeno climático “La Niña” donde las temperaturas muestran valores menores con respecto a la fase neutra.



Temperatura °C

Figura 22. Series de datos de temperatura máxima (color rojo) media (color azul) y mínima (color verde) de las estaciones ubicadas en la cuenca medial alta de río Claro. Periodo: enero de 2009 a mayo de 2016. Fuente: Elaboración de los autores

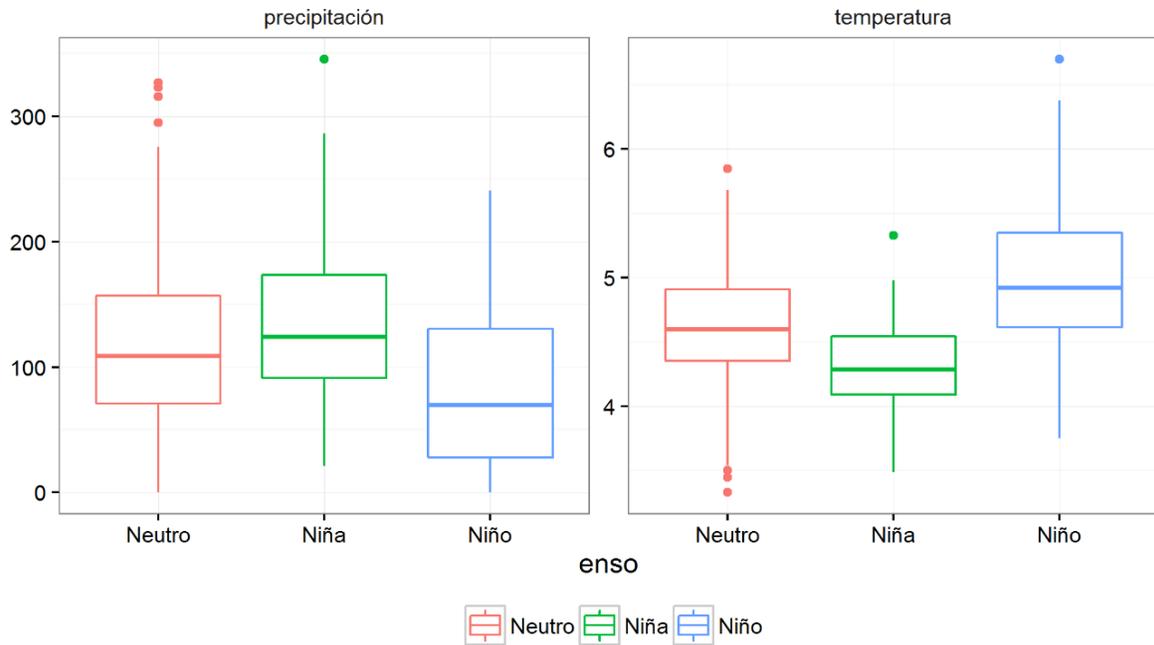


Figura 23. Relación de la temperatura y precipitación con los fenómenos climáticos extremos “El Niño” y “La Niña”. El gráfico ilustra la mediana (línea) el rango intercuartílico (caja), los percentiles 10 y 90 (bigotes) y los valores extremos (puntos) de las distribuciones de frecuencias de la precipitación y temperatura durante los fenómenos climáticos ENSO. Fuente: elaboración de los autores.

Para el análisis de las variaciones que han experimentado las temperaturas en el tiempo, así como las tendencias observadas a largo plazo, solo fue posible aplicar el Test de Mann-Kendall a la serie de datos histórica (1982-2016) de la Estación hidrometeorológica Brisas, en razón a que es la única estación en el área de estudio que posee el tiempo mínimo estipulado (30 años) por el IPCC para el estudio del clima y su variabilidad. Los datos fueron analizados por temporadas secas y húmedas multianuales, dado que la zona de estudio presenta un régimen de lluvias bimodal. Los resultados obtenidos reflejan que las temperaturas medias, máximas y mínimas han experimentado un aumento significativo durante el periodo de estudio con un 95% de confianza.

Tabla 7. Resumen test de Mann-Kendall para las temperaturas. Periodo 1982-2015

	Temperatura máxima temporada seca	Temperatura máxima temporada húmeda	Temperatura mínima temporada seca	Temperatura mínima temporada húmeda
Variación por año	0.041°C	0.039 °C	0.018 °C	0.001 °C
Variación total del periodo	1.394 °C	1.344 °C	0.618 °C	0.598 °C
Tau	0.33	0.428	0.290	0.231
P-value	0.012*	0.001*	0.0281*	0.081

Fuente: Elaboración de los autores. Lo valores con * indican que son estadísticamente significativos con un 95% de confianza.

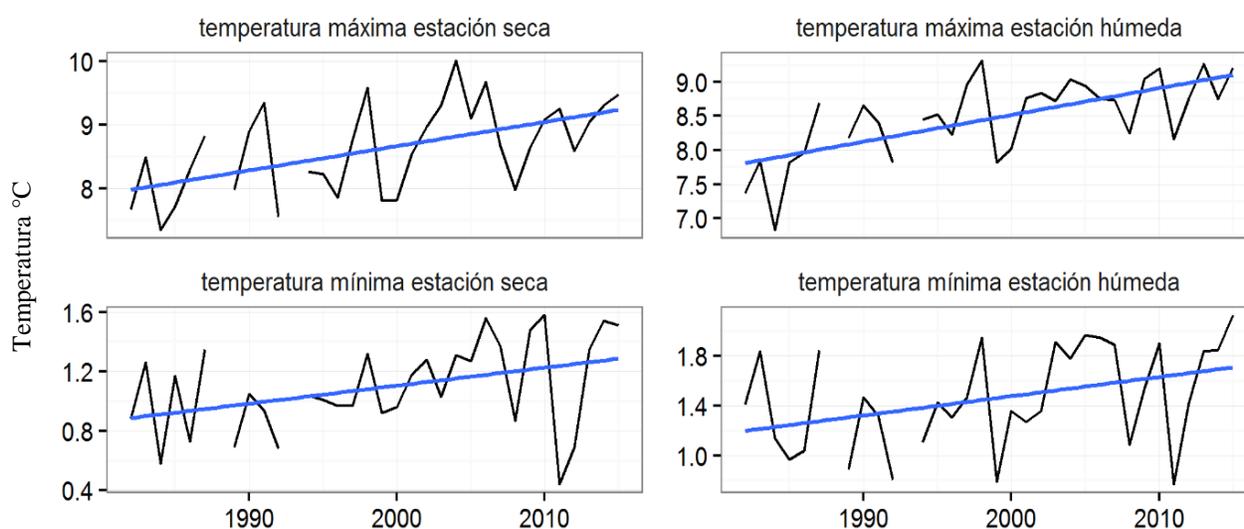


Figura 24. Variabilidad y tendencia de las temperaturas durante la temporada seca y húmeda. Estación Brisas. Fuente: Elaboración de los autores.

La figura 24, tabla 7 presentan los resultados del Test Mann- Kendall, donde a nivel general es preciso señalar que, con un 95 % de confianza, durante el periodo de enero de 1982 a diciembre de 2015, las temperaturas máximas en la zona de páramo (4150 msnm) en la cuenca del río Claro, han aumentado en promedio 1.36°C con una variación anual en promedio de 0.04, y las temperaturas mínimas 0.60°C con una variación anual de 0.018°C. Es decir que las temperaturas medias durante los 32 años analizados han experimentado un incremento cercano a un 1°C con una variación anual de 0.03°C.

De acuerdo con los resultados anteriormente descritos es preciso señalar que uno de los aportes más valiosos del presente apartado, se centra en la generación de información a escala

local, con metodologías ampliamente utilizadas a nivel científico, que brindan información confiable sobre el comportamiento de las temperaturas en la alta montaña colombiana. Los análisis realizados en el presente trabajo aportan pruebas fehacientes sobre el paulatino aumento de las temperaturas medias, mínimas y máximas en la cuenca de río Claro en los últimos 32 años. Numerosas investigaciones han analizado la variabilidad climática a nivel nacional dejando de lado la generación de información a pequeñas escalas. Según Flórez (2003), la alta montaña en Colombia tiene una extensión de 41.255 km² que corresponde a al 3.6% del área total del territorio nacional. En este sentido, la generación de información a escala nacional podría omitir particularidades importantes de cada uno de los sistemas que conforman la alta montaña.

La evidencia del calentamiento en el sistema climático global es irrefutable, desde la década de 1950 muchos de los cambios observados han tenido precedentes en los últimos decenios (IPCC 2013). A nivel nacional, Pérez et al. (1998) indican una clara tendencia de calentamiento no homogéneo en el territorio colombiano, presentando un incremento de las temperaturas mínimas y medias en mayores altitudes (alta montaña), atribuido principalmente a procesos deforestación. Trabajos más recientes complementan esta observación, (Posada 2007, Pabón 2012) indicando que dicho aumento corresponde al orden 0.1 a 0.2°C por decenio, es decir, que en los últimos 50 años la temperatura promedio del territorio colombiano habría experimentado un aumento estimado de 0.65°C. Estos estudios guardan relación con los hallazgos del presente trabajo, en cuanto se reconoce a la alta montaña como uno de los sistemas en las cuales el drástico aumento de las temperaturas será más acentuando. No obstante, los valores y tendencias consideradas en los trabajos mencionados son bajos con respecto los valores resultantes de la presente investigación, los cuales indicaron un aumento promedio de las temperaturas máximas de 1.3°C y 0.6°C en las temperaturas mínimas, con un estimado por decenio de 0.4 y 0.18°C respectivamente. Estudios realizados sobre calentamiento dependiente de la altitud, han de demostrado una amplificación en la tasa de calentamiento relacionada con el aumento de las elevaciones, y específicamente en la alta montaña. El presente trabajo encontró tendencias más fuertes en las temperaturas máximas. El IDEAM en la segunda comunicación al CMNUCC, realizó un análisis del comportamiento de la lluvia y la temperatura con series de datos históricas en la alta montaña, donde vislumbró fuertes incrementos en las temperaturas máximas en las zonas

de páramo con valores cercanos a 1°C por década, mientras en el Subpáramo y Bosque Alto Andino los incrementos fueron de 0.3°C y 0.6°C por década. Este planteamiento se diferencia con los resultados obtenidos en el presente estudio, puesto que expone un aumento en la temperatura de ecosistema páramo cercano a 1°C por década, es decir que en tres décadas en aumento sería cercano a 3°C (IDEAM, 2008).

Los resultados del presente trabajo concuerdan en gran medida con los resultados de Ruiz et al. (2012), quienes también realizaron un análisis de variabilidad hidrometeorológica en la cuenca de río Claro encontrando un aumento en las temperaturas diurnas máximas, medias y mínimas de 0.6, 0.7 y 0.5 °C en una década respectivamente. Esto demuestra la importancia de realizar estudios a pequeñas escalas que contemplen singularidades propias de los ecosistemas ubicadas en el territorio colombiano, el cual por sus características topográficas, orográficas, geográficas y biofísicas se constituye en un sistema complejo y heterogéneo que merece la pena ser estudiado a nivel local. Por otra parte, se observó que la temperatura se ve fuertemente influenciados por el fenómeno climático ENSO. Esto concuerda con el estudio realizado por el IDEAM, (2007), donde se encontró que durante el fenómeno climático “El Niño” la temperatura media del aire aumenta entre 0.2 °C y 0.5 °C y durante los períodos de ocurrencia de los fenómenos La Niña, se observan descensos importantes en la temperatura media del aire (superiores a medio grado Celsius). Así mismo Diaz, et al. (2014), aseguran que las temperaturas tropicales de gran altitud son moduladas por el fenómeno climático ENSO y según Van der Hammen et.al., (2002) y Diaz et al. (2014), se espera que con el cambio climático el ENSO incremente en duración e intensidad, lo que podría resultar en una fuerte y prologada sequía o la ocurrencia de excepcionales lluvias que afectaría de manera pronunciada a los ecosistemas situados en la alta montaña. Frente a esta problemática, no se ha generado ningún tipo de iniciativa local que aporte a la mitigación y adaptación de los efectos asociados, a pesar de que a nivel mundial se reconoce dramáticas implicaciones socioeconómicas y ambientales que puede acarrear (IDEAM, 2007).

Los aumentos y variabilidad en la temperatura corresponden a un fenómeno global y pueden deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC 2013). Uno de los sistemas más

amenazados por el cambio climático, a juzgar por el súbito retroceso de sus glaciares, son los Andes tropicales y ecuatoriales (Poveda et al., 2009; IPCC, 2013), los cuales, por su localización latitudinal presentan temperaturas mucho más altas y mayor número de horas de luz al año que las montañas situadas en latitudes medias, registros de diferentes regiones a nivel mundial indican que la magnitud de los cambios de la temperatura ha sido mayor en elevaciones más altas (Díaz et al., 2014), Ohmura (2012), evaluó registros de temperatura de estaciones ubicadas en elevaciones altas y bajas a largo plazo para estudiar diferencias y tendencias, encontrando que aproximadamente el 60% de las áreas analizadas presentaron un incremento del aumento de la temperatura en elevaciones más altas (Wang et al., 2013) también argumentan una mayor tendencia al calentamiento en las elevaciones más altas en comparación con sitios de menor elevación.

En cuanto a los impactos que tendría y está viviendo actualmente la alta montaña colombiana a consecuencia del aumento de la temperatura son entre otros, el desplazamiento de la vegetación a mayores alturas, la erosión y deslizamientos de tierra en las laderas más empinadas, la afectación de la vegetación propia del Páramo y bosque Altoandino por la disminución de la humedad que ha conllevado a su fragmentación y al calentamiento de sus bordes más bajos, generando grandes incendios naturales y antropogénicos (Herzog, et al, 2010), y ambientes más propicios para la agricultura y ganadería. Este escenario sumado a la precaria gestión ambiental, gestión al cambio climático y frágil institucionalidad en la cuenca de río Claro podría acelerar la afectación de sus ecosistemas, disminuir su resiliencia y finalmente propiciar su extinción y con ello, afectar la disponibilidad del recurso hídrico y la seguridad alimentaria a nivel nacional. Esto teniendo en cuenta que es en los andes tropicales, en el ecosistema páramo en donde nacen los principales sistemas fluviales.

8.3.2.2. Precipitación

Para el análisis exploratorio de las precipitaciones en la cuenca, se utilizaron las series de datos de cuatro estaciones pluviométricas. Al igual que con la temperatura se realizó la homogeneización y rellenos de datos ausentes y se graficaron las series de datos (figura 25). Como se mencionó con anterioridad, la cuenca del río Claro coincide con la posición media de la ZCIT, condición que genera circunstancias específicas de circulación de masas de aire y determina algunas de las principales características del clima, tales como lluvias abundantes

con régimen de distribución bimodal con dos periodos de lluvia máxima (temporada húmeda) uno de abril a mayo y otro de octubre a noviembre con valores de precipitación acumulada media mensual de 132 mm y dos periodos de lluvia mínima (temporada seca), uno de enero a febrero y otro de julio a agosto con una precipitación acumulada media mensual en promedio de 55 mm. La precipitación acumulada anual para el periodo de estudio (2009-2016) en la parte alta de la cuenca (zona nival y Periglaciario) es en promedio de 1158 mm, en la parte media (Paramo) de 1259 mm, y en la parte baja (bosque Altoandino y zona intervenida) de 1075 mm.

La figura 18 presenta las series de datos mensuales de la precipitación acumulada multianual donde es posible denotar al igual que en la temperatura, la fuerte influencia de los fenómenos climáticos ENSO, con una disminución de la precipitación durante el periodo de agosto de 2009 a marzo de 2010 y mayo de 2015 a marzo de 2016 que coincide con el fenómeno climático “El Niño”, contrario al periodo de agosto de 2010 a marzo de 2011 donde se observa un aumento significativo de las precipitaciones influenciado por un evento “La Niña”. Así mismo, las graficas presentan una leve tendencia a la disminución de las precipitaciones. Sin embargo, al tratarse de series de únicamente 10 años de datos, no se puede hablar de tendencia, sino lo más probable es que se trate de un ciclo de variabilidad decadal, que podría estar relacionado con la Oscilación Decadal del Pacífico, patrón de variabilidad climática que gobierna las condiciones de precipitación y temperatura en el Pacífico desde Alaska hasta el Ecuador, ya que como argumenta Poveda (2004), la Oscilación Decadal del Pacífico ejerce un efecto no despreciable sobre el clima del país.

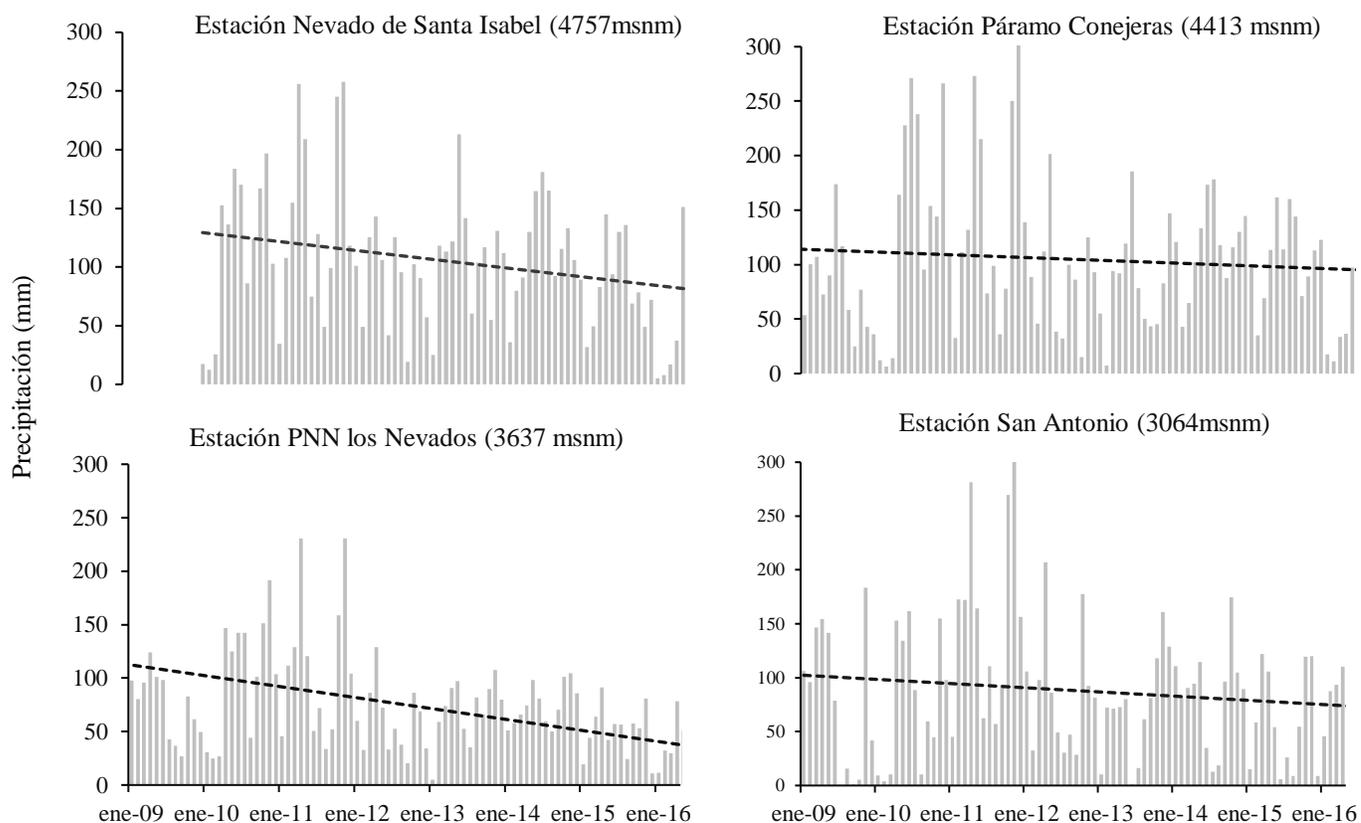


Figura 25. Series de datos de precipitación acumulada mensual de las estaciones ubicadas en la cuenca medial alta de río Claro. Periodo: enero de 2009 a mayo de 2016. Fuente: Elaboración de los autores

Para estudiar el comportamiento histórico de las precipitaciones, y la existencia de tendencias a largo plazo, al igual que las temperaturas, se analizó la serie procedente de la estación de Brisas (4150 m.snm), que contiene datos pluviométricos desde 1982 a 2015. Se aplicó el test de Mann-Kendall a las series diferenciando entre las precipitaciones en temporada seca y húmeda. Los resultados obtenidos (tabla 8, figura 26) muestran que, pese a que se aprecia un ligero descenso de los valores de precipitación en temporadas secas con una variación por año de -0.476 mm (variación total del periodo de -16.1 mm) y en temporadas húmedas, con una variación por año de -3.018 mm (variación total de -102.6 mm), estos valores de cambio no son estadísticamente significativos con un 95% de confianza, por lo que no se puede hablar de la existencia de tendencias en la precipitación en nuestra zona de estudio.

Tabla 8. Resumen test de Mann-Kendall para las precipitaciones acumuladas. Periodo 1982-2015

	Precipitación acumulada temporada seca	Precipitación acumulada temporada húmeda
Variación por año	-0.476mm	-3.018 mm
Variación total del periodo	-16.190 mm	-102.6 mm
Tau	-0.026	-0.084
P-value	0.858	0.540

Fuente: Elaboración de los autores. Lo valores con * indican que son estadísticamente significativos con un 95% de confianza.

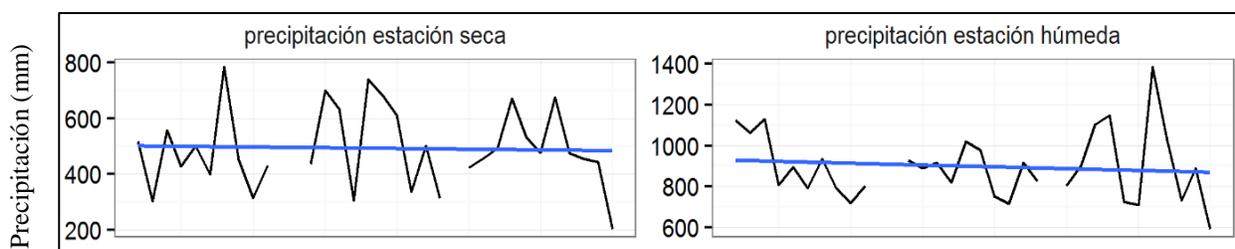


Figura 26. Variabilidad y tendencia de las temperaturas durante la temporada seca y húmeda. Estación Brisas. Fuente: Elaboración de los autores.

Investigaciones enfocadas en el estudio de las precipitaciones en un contexto de cambio climático a nivel mundial, como la realizada por el IPCC (2001, 2007, 2013) sustentan un posible aumento de las precipitaciones del orden de 0.2 a 0.3% por década y una marcada intensificación de las mismas desde el año 1902, lo cual concuerda con lo planetado por Jones & Hulme (1996) y Hulme et al. (1998), quienes argumentan que la precipitación a nivel mundial se ha incrementado alrededor de 2% desde el comienzo del siglo 20. Escenarios realizados por el IDEAM para la tercera comunicación ante la CMNUCC, revelan que para el periodo 2071 – 2100, se espera que la precipitación aumente entre 10 a 30% en cerca del 14% del territorio nacional (Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá). Conjuntamente, Ruiz et al (2012), en un estudio de variabilidad hidroclimática en la alta montaña, no observaron cambios significativos en las precipitaciones, pero evidenciaron una mayor ocurrencia de eventos de lluvias inusualmente fuertes. Este planteamiento lo debaten Mekis & Hogg (1999), quienes observaron en registros de precipitaciones anuales de los Andes de Sudamérica, tendencias negativas al oeste y positivas al este. Así mismo, Pabón (2003, 2012), sustenta, que las precipitaciones y caudales han venido presentando cambios diferenciados

por regiones con una leve tendencia a la disminución en la región caribe, pacífico y en el sur de la región andina, donde los páramos exhiben tendencias a la disminución de eventos extremos de lluvia contrario a los demás pisos térmicos que ilustraron tendencias positivas. En este sentido, es posible denotar que existe gran incertidumbre acerca de las aseveraciones sobre la evolución y variabilidad de las precipitaciones en un contexto de cambio climático. Por lo cual, no es posible concluir sobre su dinámica y proyecciones.

Por otra parte, para el análisis de la relación entre las precipitaciones y los fenómenos climáticos ENSO, se graficaron las precipitaciones registradas durante la fase fría “La Niña”, cálida “El Niño” y neutra, en boxplot. Se utilizó el Índice de ENSO ONI (por sus siglas en inglés), y se filtraron los valores de precipitación de acuerdo a los datos de este índice. Los datos del fenómeno “La Niña” corresponden a los valores iguales o menores a -0.5; los de “El Niño” iguales o mayores a 0.5 y los de la fase neutra menores a 0.5 y -0.5. La figura 23, ilustra como las precipitaciones ven influenciadas de los fenómenos climáticos entremos “La Niña” y “El Niño”. El boxplot muestra de manera general que durante las fases “El Niño”, las precipitaciones disminuyen gradual y diferenciadamente con respecto a la fase neutra. Caso contrario ocurre bajo la influencia del fenómeno climático “La Niña”, donde las precipitaciones aumentan progresivamente. Lo que concuerda con Poveda et al (2002), Hurato & Moreno (2007), Ramírez & Jaramillo (2009), Poveda, et al (2012) e IDEAM (2014), quienes exponen que en la región Andina particularmente, durante los eventos climáticos, “El Niño”, se presentan las deficiencias en las lluvias impactando mas del 50% del territorio colombiano, generando la reducción de la precipitación y al aumento de la evaporación y la evapotranspiración, produciendo una disminución de la disponibilidad hídrica en las diferentes regiones hidrográficas del país. El déficit en los rendimientos hídricos a su vez reduce considerablemente la oferta natural de agua para el abastecimiento de la población, la generación de energía y los sistemas de riego para la agricultura. Caso contrario ocurre con los eventos “La Niña”, en donde se presentan impactos por excesos de lluvia, que conllevan a fuertes inundaciones . Asimismo Puertas & Carvajal (2008) sustentan que los Fenómenos climáticos de gran escala afectan a la disponibilidad (por déficit o excedencia) y la calidad del recurso hídrico en el país. En particular, el fenómeno ENSO tiene fuerte incidencia sobre la hidrología de Colombia. El Niño se relaciona con disminución de las lluvias y el caudal de los ríos, lo cual ocasiona sequías, incendios forestales,

raconamientos energéticos, disminución en la producción, agrícola, pesquera y pecuaria. Durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies con las consecuentes repercusiones sobre los recursos hídricos y la sociedad. En conclusión los fenómenos climáticos ENSO han sido la causa de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones del país, ocasionando un efecto negativo sobre el medio físico natural y un impacto social y económico de grandes proporciones (IDEAM, 2014). De acuerdo con la anterior, es preciso señalar que a pesar de que no existe una tendencia clara en la evolución de las precipitaciones en el contexto de cambio climático, estas sí se están viendo fuertemente impactadas por el fenómeno climático ENSO, al cual, de cumplirse los supuestos de Van der Hammen et.al., (2002) y Diaz et al. (2014) sobre su incremento en intensidad y duración como respuesta al cambio climático actual, podría generar grandes impactos sobre la alta montaña colombiana.

8.3.3. *Análisis hidroclimático de las subcuencas de estudio (Glaciar, Páramo y Bosque Altoandino)*

La "cobertura" de la tierra, es la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra, en un término amplio que no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también incluye otro tipo de superficies abióticas como afloramientos rocosos, cuerpos de agua y nieves. Su estudio es fundamental, para el conocimiento de los ecosistemas, fauna flora, seguimiento a la deforestación de los bosques, inventarios forestales, y el entendimiento del ciclo hidrológico para la ordenación de cuencas y del territorio (IDEAM, 2010). La presente investigación caracterizó el comportamiento hidroclimático de tres subcuencas (Glaciar, Páramo y bosque Altoandino), a fin de comprender el ciclo hidrológico de la alta montaña y especialmente de cada uno de los ecosistemas allí presentes (glaciar, páramo y bosque Altoandino), ecosistemas diferenciados que se suceden en el gradiente altitudinal, y que se encuentran sometidos al impacto del cambio climático y la acción antrópica, y cuya relevancia hidrológica para las regiones de piedemonte es esencial. Numerosas investigaciones a nivel nacional e internacional han estudiado a fondo la composición biótica y abiótica, fenología, edafología, geología e hidrología entre otras, de los ecosistemas presentes en la alta montaña. No obstante, son pocos los estudios enfocados a comprender el ciclo hidrológico de estos ecosistemas desde una mirada integral. Asimismo, no existen estudios que analicen el

comportamiento hidrológico de la alta montaña en cuencas con control hidrométrico, como en el presente estudio. Gracias a una red de monitoreo hidroclimático instalada durante los años 2008-09, por el IDEAM, se han podido obtener series hidrológicas de estos ecosistemas en un gradiente altitudinal desde los 2700 hasta los 4800 m altitud. En este sentido, el presente apartado presenta en primera medida la caracterización de las coberturas de la tierra, y posteriormente analiza el comportamiento hidrológico de los ecosistemas presentes en la alta montaña por medio del análisis de tres subcuencas de estudio. A continuación, se presentan los resultados.

8.3.3.1. Caracterización coberturas de la tierra cuenca del río Claro

Para el análisis de las coberturas de la tierra, se tomó como base la cartografía 1:100.000 realizada por el IDEAM 2009-2011. No obstante, teniendo, en cuenta la escala comparada con el área de estudio, fue necesario realizar una reinterpretación visual con el apoyo de imágenes satelitales Landsat y Sentinel Una vez se definieron las coberturas presentes en la zona de estudio, se procedió a analizar la evolución del recurso hídrico en dichas coberturas relacionándolo a su vez con el clima. La tabla 9, figura 27 caracterizan las coberturas de la tierra de la cuenca del río Claro. La tipología implementada fue propuesta por el IDEAM y se constituye en una estructura jerárquica de las coberturas de la tierra con base en criterios fisonómicos de altura y densidad. Además, son unidades representativas de la complejidad ambiental y de la dinámica de apropiación y uso del territorio (IDEAM, 2010). A continuación, se describe cada una de las coberturas de acuerdo a la caracterización realizada por IDEAM en el año 2010, puesto que la información detallada de cada uno de los ecosistemas presentes en el área de estudio desde el punto de vista biofísico, ya fue mencionada con anterioridad en el apartado de metodología (área de estudio).

Las *Zonas glaciares*, corresponde al 1.3 % del área total de la cuenca de río claro, con un área estimada de 0.96 Km². Son áreas cubiertas por hielo en forma permanente caracterizadas por la presencia de nieve durante las temporadas húmedas (IDEAM, 2010); por otra parte, *los Afloramientos rocosos representan* el 4.70 % del área total de la cuenca y se caracterizan por ser áreas en las cuales la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas, se localizan principalmente en las áreas de fuerte pendiente, donde predominan los sustratos de rocas duras y resistentes, asociadas con fallas y deformaciones geológicas,

volcanes y glaciares de montaña, (IDEAM, 2010). Particularmente en la zona de estudio, se ha observado que estas están siendo colonizadas por vegetación propia del páramo.

La *roca suelta y vegetación pionera*, posee un área del 0.53% total de la cuenca, son territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve (IDEAM, 2010); *Los Arbustales o Herbazales*, son un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica (IDEAM, 2010). Tiene un porcentaje del 40% total de cuenca del río Claro, representada en el ecosistema Páramo-

El Bosque Fragmentado, comprende los territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos cuya continuidad horizontal está afectada por la inclusión de otros tipos de coberturas como pasto, cultivos o vegetación en transición (IDEAM, 2010). En la cuenca representa el 15% total del área siendo un bosque Altoandino altamente intervenido por actividades antrópicas tales como la agricultura, ganadería y aprovechamiento forestal; los *Pastos limpios*, comprenden las tierras ocupadas por pastos con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70% (IDEAM, 2010). En la cuenca del río Claro, comprenden espacios dedicados principalmente a la ganadería y representan un 39% total del área, el cual es un valor relativamente alto dado que estos espacios en tiempos pasados fueron ambientes colonizados por el bosque Altoandino. Finalmente, los *cultivos transitorios* presentan un área total del 0.7% de la cuenca. Comprenden las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses, tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo. En la cuenca estos espacios están dedicados al cultivo de papa como se había mencionado con anterioridad en el apartado 8.2.1.

Tabla 9. Coberturas de la tierra cuenca del río Claro

Cobertura de la tierra	Área (Km2)	Porcentaje (%)	Altura (m)
Zonas glaciares	0,96	1,3	4700-4900
Sin cobertura (afloramiento rocoso)	3,3	4,70	4550-4700
Roca suelta y vegetación pionera	0,38	0,53	4300-4550
Arbustales o Herbazales	27,7	40	4000-4300
Bosque Fragmentado	10,4	15	3000-3800
Pastos limpios	27,5	39	3000-4000
Cultivos	0.49	0.7	7000-4000
Total	70,4	100	2700-4900

Fuente de datos: IDEAM, elaboración de los autores.

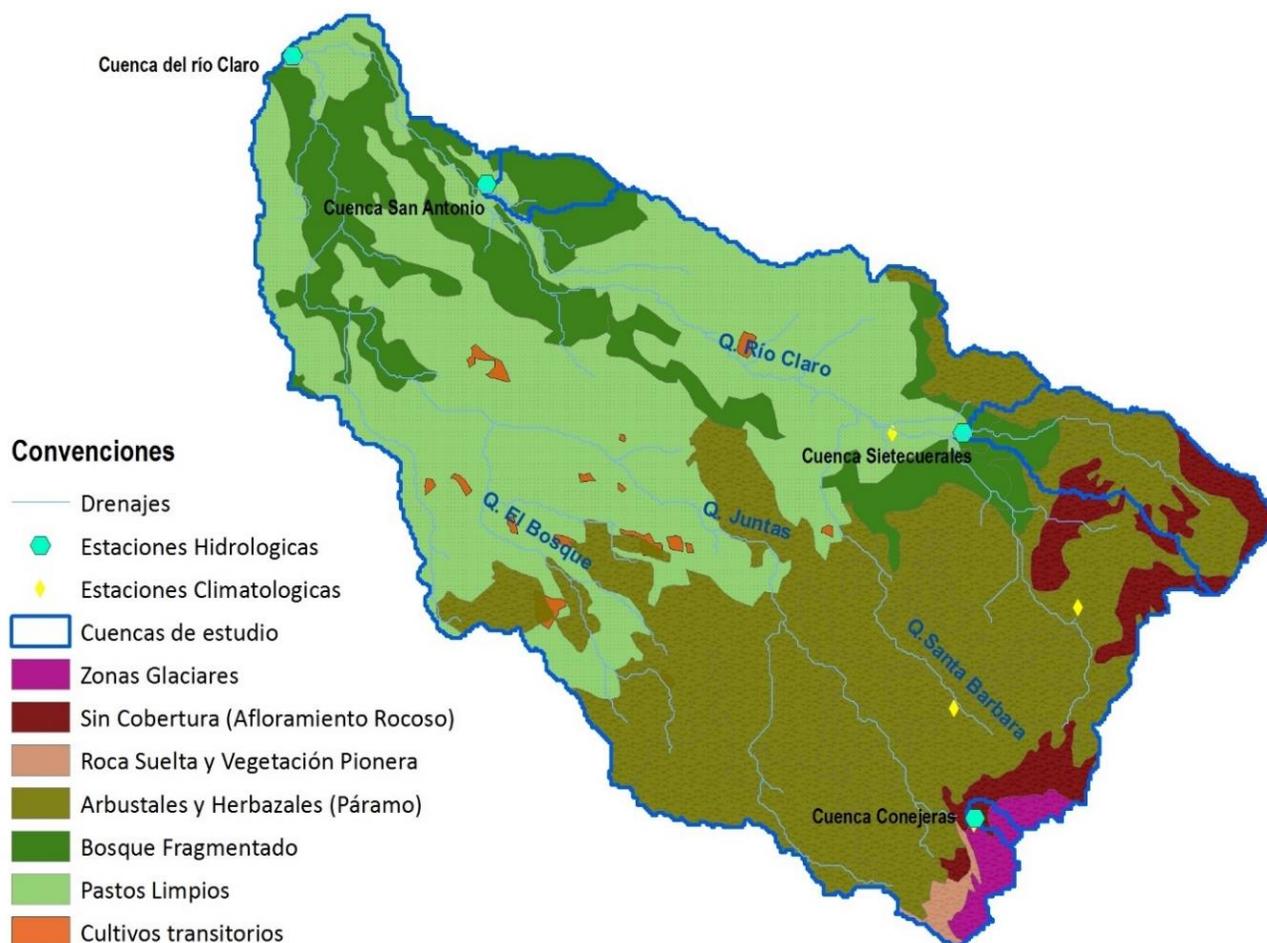


Figura 27. Coberturas de la tierra cuenca del río Claro. Fuente: IDEAM, 2010. Elaboración: de los autores

8.3.3.2. análisis hidroclimático en las subcuencas Glaciar, Páramo y Bosque Altoandino

Una vez se caracterizaron las coberturas de la tierra, se procedió a analizar los caudales, balance y aportes hídricos en cada de las subcuencas de estudio con los datos de las estaciones hidrológicas ubicadas en cada uno de los puntos de drenaje. Las estaciones seleccionadas fueron: 1. Estación hidrológica Conejeras, en la cual drenan las aguas provenientes del glaciar Conejeras situado en el volcán nevado Santa Isabel; 2. Estación Sietecuerales, en donde drenan las aguas provenientes del ecosistema paramo; 3. Estación San Antonio, que registra el agua providente del Bosque Altoandino y finalmente se encuentra la Estación Río Claro, la cual recibe toda el agua proveniente de los diferentes ecosistemas de la cuenca del río Claro (ver figura 27).

El análisis de los caudales inició con la depuración y homogeneización de las series de nivel del agua (m). Se realizó la detección de datos faltantes, saltos temporales, outliers, inhomogeneidades y corrección de errores mediante procedimientos estadísticos. Posteriormente se llevó a cabo la conversión de niveles de agua (m), medidos en las estaciones hidrológicas, a caudal (litros/segundo). Para ello, se solicitó al IDEAM las curvas de gasto de las estaciones anteriormente mencionadas excepto la de la Estación hidrológica Conejeras, en la cual se encuentra una estructura hidráulica llamada “Canaleta Parshall” que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección. Para la conversión de nivel a caudal en este sistema se utilizó la ecuación que ya había sido prediseñada con las dimensiones de la estructura. Cabe señalar que, pese a que las otras estaciones hidrológicas de la cuenca, fueron instaladas desde el año 2009, no ha sido posible la validación de las curvas de gasto, puesto que se cuenta con muy pocas campañas de aforos, lo que ha imposibilitado la generación de curvas de gasto con un buen nivel de confianza.

Para el presente estudio se utilizaron las curvas de gasto generadas por el grupo de hidrología del IDEAM, una de las cuales ya fue validada y aceptada (Estación Río Claro) y dos que se encuentran en proceso de validación (Sietecuerales y San Antonio). Una vez obtenidas las series de caudal, se procedió a calcular de medias diarias, aportes fluviales mensuales, anuales y balance y rendimiento hídrico. Durante este proceso se encontraron numerosos problemas derivados de fallos en los sensores que registran el nivel. Por ejemplo, la ausencia de datos durante largos periodos (de 6 a 12 meses), la existencia de datos anómalos de forma

continuada y la existencia de inhomogeneidades. Estos errores se depuraron en la medida de lo posible, para poder hacer una estadística fiable con los datos, No obstante, se debe tener en cuenta que las conclusiones que se extraigan de este apartado, son dependientes de los datos y como tal, deben considerarse con precaución. La figura 28 muestra las series de caudal de las cuatro estaciones analizadas antes del proceso de homogeneización y relleno de los datos ausentes.

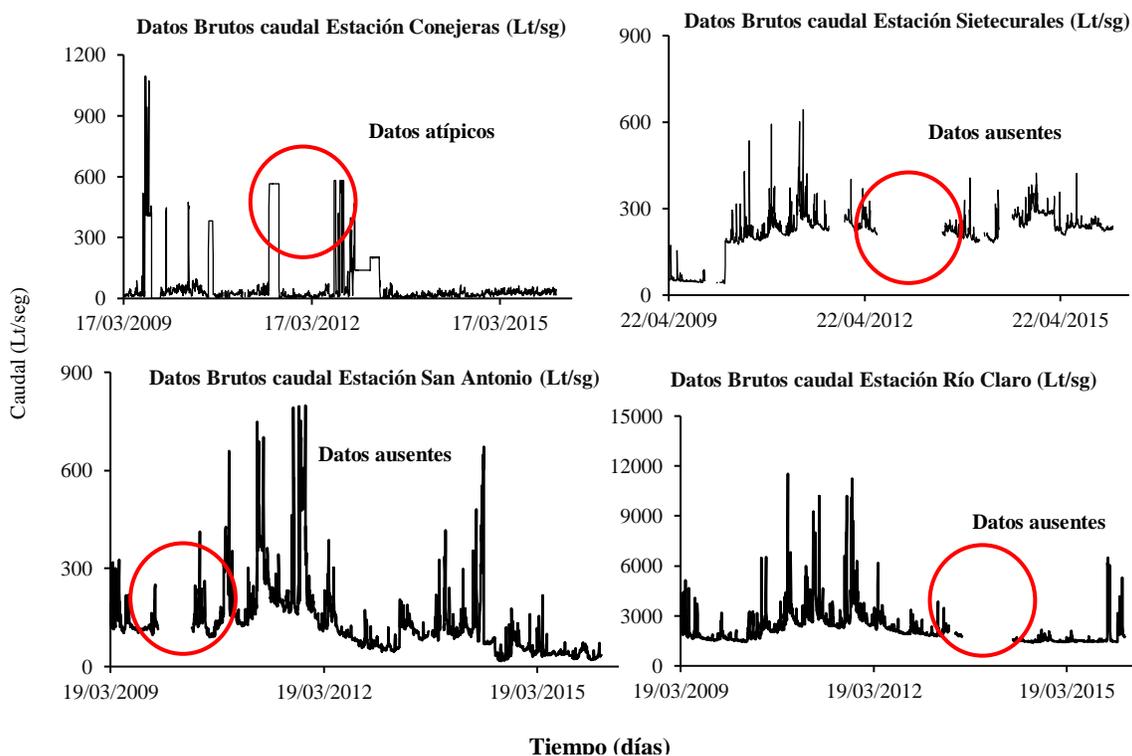


Figura 28. Series de datos sin procesar estaciones hidrológicas cuenca del río Claro.
Fuente: Elaboración de los autores

Una vez se homogenizaron y rellenaron las series de datos, se procedió a calcular los aportes fluviales diarios. La figura 29 presenta las series de datos resultantes luego de aplicar los procedimientos anteriormente descritos.

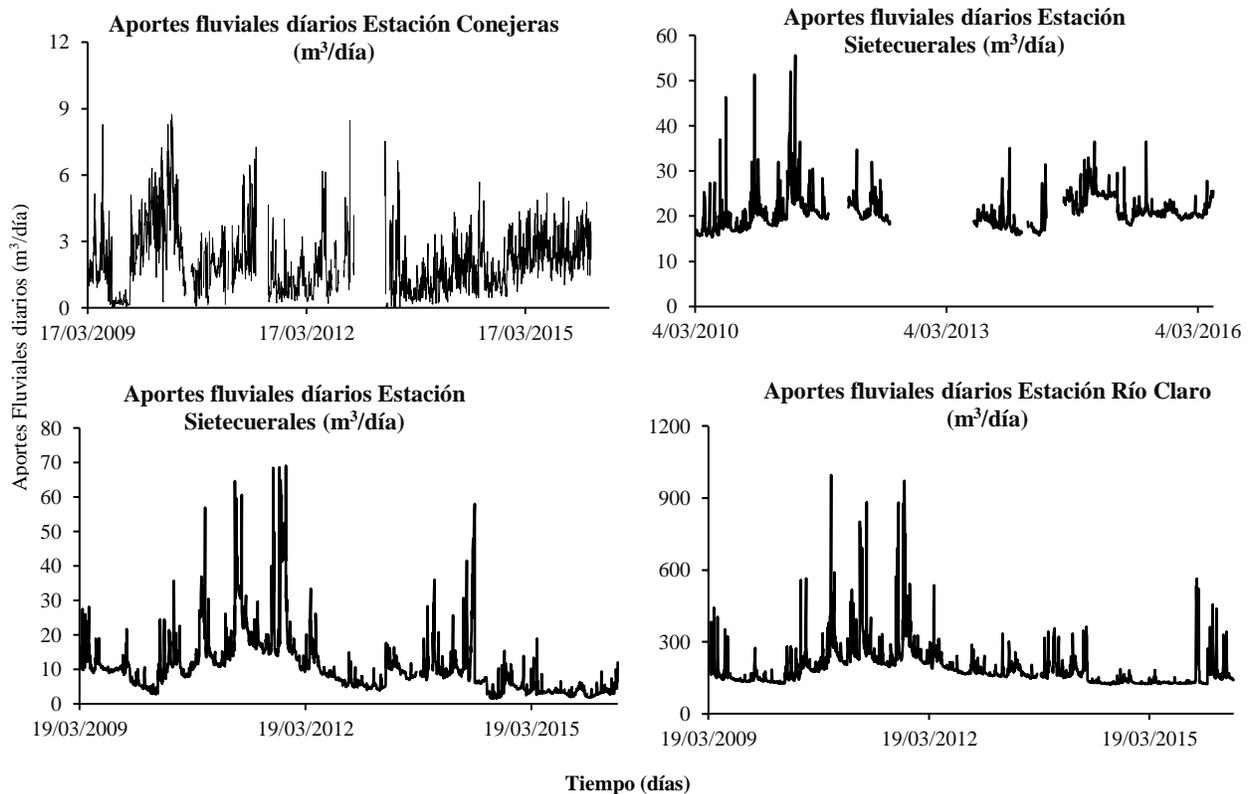


Figura 29. Series de datos de aportes fluviales cuenca del río Claro. Fuente: Elaboración de los autores

Como se observa en la figura 29, los aportes fluviales de la estación Conejeras provenientes en su mayoría de los procesos de ablación del glaciar, presentan un comportamiento diferenciado al de las estaciones ubicadas en los ecosistemas Páramo y bosque Altoandino, las cuales muestran un comportamiento hidrológico muy similar. Estas series de datos, al igual que en las variables de temperatura y precipitación, revelan una variabilidad estacional a consecuencia del régimen de precipitación bimodal de la zona de estudio y una fuerte influencia del fenómeno climático ENSO, reflejado en picos con valores muy superiores a la media, presentados durante el año 2011, periodo influenciado por el fenómeno climático extremo “La Niña”. Así mismo, se observa una disminución de los aportes de agua durante el primer trimestre de 2010 y el segundo semestre del año 2015 que coincide con influencia del fenómeno climático “El Niño”. Por otra parte, y con el fin de caracterizar la dinámica hidrológica de cada uno de los ecosistemas, se graficaron las series de datos de los aportes fluviales junto con las series de precipitaciones acumuladas diarias, así como los resultados del balance hídrico y rendimiento hídrico o caudal específico. Para el caso de la estación

Conejeras se tuvo en cuenta además las temperaturas. Esto teniendo en cuenta que los caudales registrados son producto de los procesos de ablación del glaciar Conejeras.

La figura 30 presenta el ciclo diario de los caudales a la salida del glaciar conejeras junto con el ciclo diario de las temperaturas. Se observa una clara correspondencia entre las dos variables, de tal forma que cuando comienzan a aumentar las temperaturas a primeras horas de la mañana, se empieza a producir el derretimiento del glaciar, con el consecuente aumento del caudal. Cabe señalar que los caudales provenientes de los glaciares tienen una variabilidad mensual bien definida teniendo una dinámica diferente a las cuencas no glaciadas. Durante las temporadas secas las temperaturas aumentan, por ende, la cobertura de nieve disminuye, generado que el glaciar sea más susceptible a la fusión y aumento de los aportes de agua líquida, constituyéndose el glaciar en un importante aportante de agua durante las temporadas secas. Contrario a las temporadas húmedas donde al aumentar la precipitación sólida y disminuir la temperatura y la radiación solar, el glaciar disminuye sus procesos de fusión y sus aportes de agua pueden llegar a ser inexistentes (IDEAM, 2012).

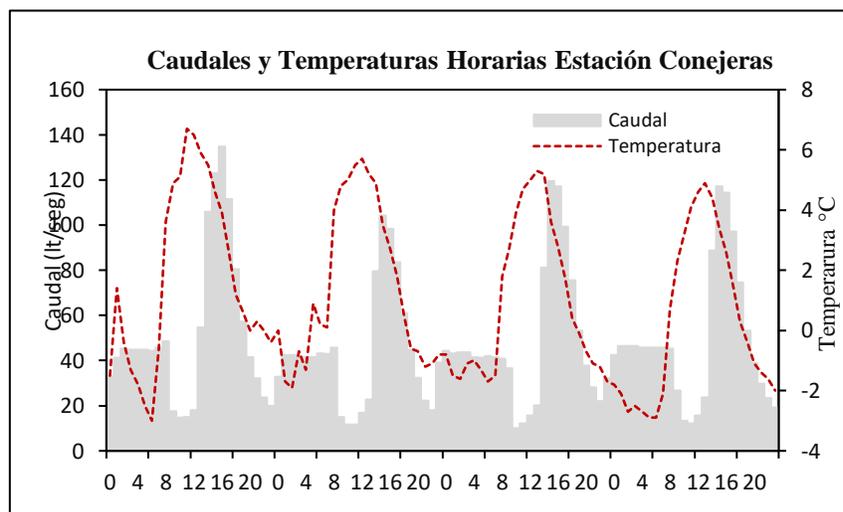
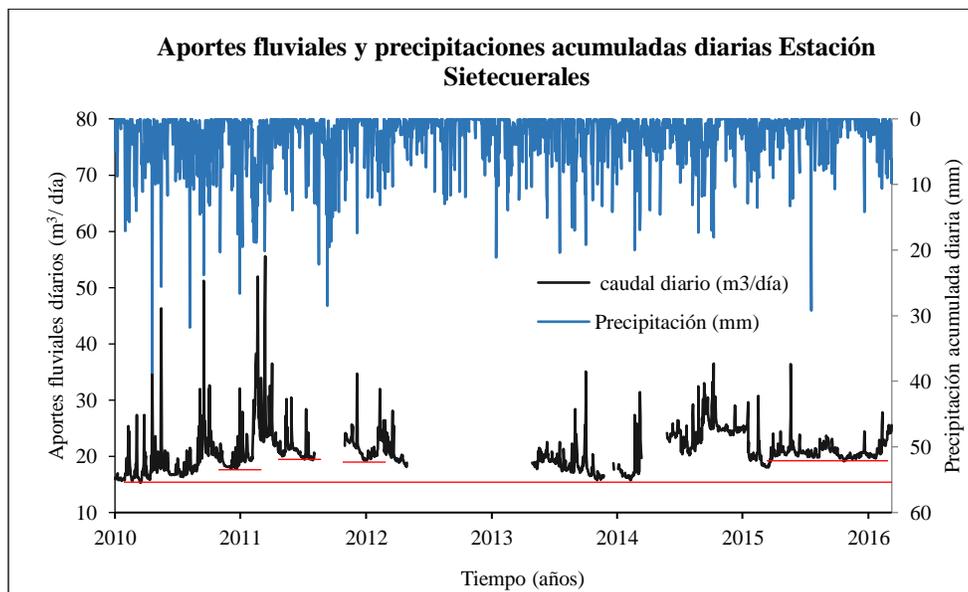


Figura 30. Caudales y Temperaturas Horarias Estación Conejeras. Fuente: Elaboración de los autores

Por otra parte, en las series de datos diaria de la estación Sietecuerales (Figura 31) que registra los aportes hídricos provenientes del ecosistema paramo, es clara la existencia de un aporte base por debajo del que no se presentan registros y un aumento progresivo de dicho aporte en la medida en que se generan eventos continuos de precipitación. Los eventos de precipitación implicarían entonces, aumentos súbitos del aporte hídrico. Estas observaciones permiten concluir que el ecosistema de páramo presenta una enorme capacidad de regulación

y retención hidrológica. Por ejemplo, durante el pasado fenómeno climático extremo “El Niño” que tuvo lugar durante segundo semestre del año 2015 y primer trimestre del año 2016 y es considerado uno de los más fuertes de la historia, se puede observar claramente como el aporte de agua del Páramo, aumentó su nivel base con respecto a la media histórica y se mantuvo relativamente constante aportando agua regularmente al bosque Altoandino, a pesar de la intensa sequía a la que estuvo expuesto. En este sentido, y sin contar con registros de humedad del suelo podemos presumir que los suelos de los páramos se encuentran en un permanente estado de saturación, o semisaturación, lo que hace que bien por flujos subsuperficiales o por flujo hortoniano, el sistema esté continuamente produciendo agua, como se aprecia en la figura 31.



*Figura 31. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación Sietecuerales
Fuente: Elaboración de los autores*

Por su parte, el ecosistema de bosque Altoandino tiene un comportamiento hidrológico similar al del páramo (Figura 32), si bien la fluctuación estacional del nivel es ligeramente más elevada, pero los picos del mismo no son tan acentuados como en el páramo. Estas diferencias se pueden deber principalmente a la capacidad del dosel arbóreo del bosque para suavizar los eventos de precipitación, con respecto a la vegetación más arbustiva y rala del ecosistema de páramo. Conjuntamente, como se observa en la figura 33 el bosque Altoandino a diferencia del páramo durante el pasado fenómeno climático “El Niño” presentó una disminución significativa de los aportes hídricos.

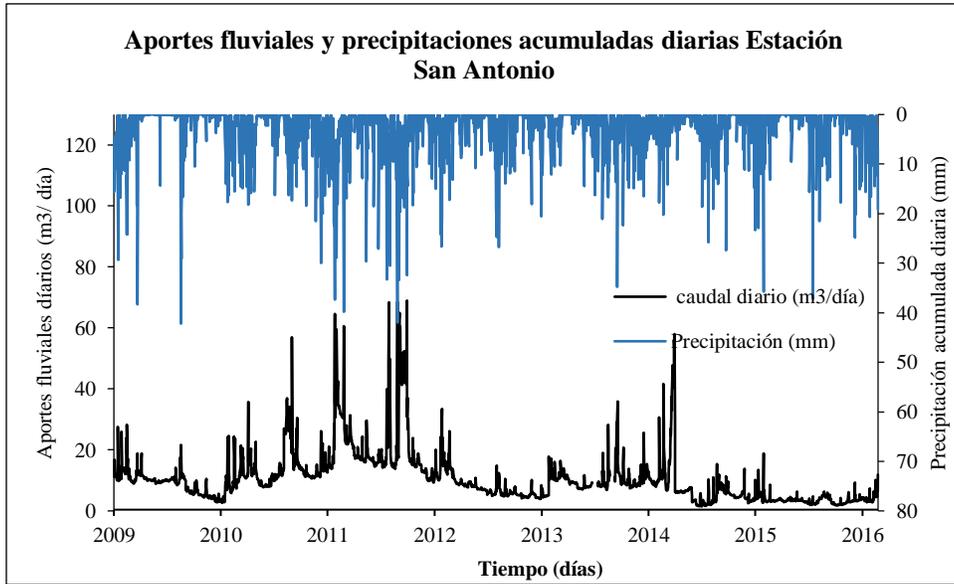


Figura 32. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación San Antonio.
Fuente: Elaboración de los autores

Finalmente, la figura 33 presenta los aportes hídricos diarios de toda la cuenca del río Claro, en donde drenan aguas provenientes del glaciar Conejeras, el Páramo, el Bosque Altoandino y la zona intervenida situada en la parte baja de la cuenca. En esta, es posible denotar la similitud con el comportamiento hidrológico del Páramo y el Bosque Altoandino. No obstante, a diferencia del bosque Altoandino durante al pasado fenómeno “El Niño” esta, no presentó una disminución significativa de los aportes hídricos.

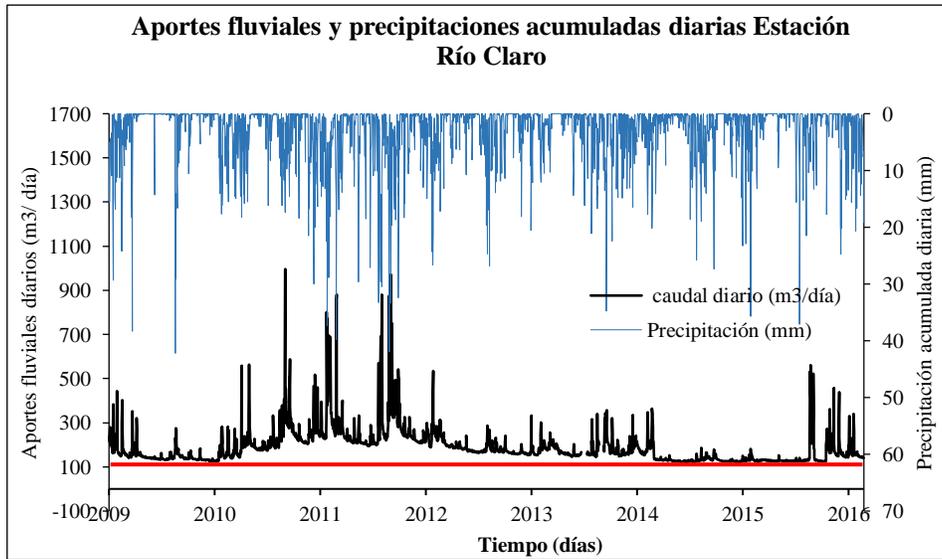


Figura 33. Aportes fluviales y precipitaciones acumuladas diarias Estación Río Claro Fuente: Elaboración de los autores

Además de los análisis exploratorios de los caudales y aportes fluviales de las subcuencas de estudio, también se realizó el balance hídrico y el cálculo de rendimiento hídrico, con el fin de comparar el comportamiento hidrológico de cada una de las subcuencas de estudio. Según (UNESCO, 1981), el balance hídrico se constituye en una de los principales métodos de la hidrología para hacer una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos y sus modificaciones por influencias antrópicas o naturales. Conjuntamente, este método es muy importante en el entendimiento del ciclo hidrológico, ya que con su estudio es posible comparar recursos hídricos específicos de un sistema en diferentes periodos de tiempo, a fin de establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural. Este método se basa en la aplicación del principio de conservación de la masa, también conocida como ecuación de la continuidad, que establece que para cualquier volumen arbitrario de agua y durante un periodo de tiempo la diferencia entre las entradas y salidas de un sistema estará condicionada por la variación del volumen del agua almacenada. La ecuación del balance hídrico para cualquier cuenca o zona natural presenta los valores relativos a las entradas (precipitación horizontal, lluvia o nieve y aguas subterráneas) y las salidas (evapotranspiración, infiltración y escorrentía). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye (UNESCO, 1981). De acuerdo con lo anterior, el balance hídrico de determinada cuenca o zona natural debería presentar una similitud en los valores de entrada y salida, al terminar el año hidrológico, suponiendo que las reservas de agua en el suelo se han agotado.

La figura 34 muestra los balances hídricos de dos de las 4 estaciones de aforo, la de Conejeras que recoge las aguas procedentes del glaciar, y la de Río Claro, que recoge las aguas de toda la cuenca de estudio. Es preciso señalar que en las estaciones intermedias de Sietecuales (páramo) y San Antonio (bosque altoandino), se realizó igualmente el balance hídrico que iguala los caudales con la diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración. Sin embargo, los resultados de los mismos se han descartado y no se muestran en este trabajo, por encontrarse los caudales totalmente sobreestimados, dando lugar a un balance erróneo. Ello se debe, pensamos, a que las curvas de gasto (ecuación hidrológica que estima la relación entre nivel de agua y caudal) realizadas para convertir el nivel de agua (cm) en caudal (m^3/s) han sido mal calculadas en las mediciones de campo. Se trata de un problema ajeno a la

realización de este trabajo, que, pese a los esfuerzos dirigidos, no se ha podido corregir durante el tiempo de elaboración del mismo. Volviendo a la figura 34, se observa que la estación Conejeras, situada en el piso geomorfológico periglacial, presenta valores muy diferentes en las entradas y salidas. Esto no es sorprendente, ya que la mayor parte de caudal registrado en la estación de aforos no proviene de las precipitaciones, sino de la fusión del glaciar. Esta diferencia entre las entradas y salidas aumenta considerablemente durante los años 2010 y 2015 con valores de hasta 4341mm, probablemente por la influencia del fenómeno climático “El Niño”. Conjuntamente los ecosistemas presentes en estas subcuencas (Páramo y Bosque Altoandino) se caracterizan por su gran capacidad de captar lluvia horizontal (Niebla) (Buytaert, et al., 2006). Sin embargo, en la zona de estudio no existen instrumentos para la medición de esta importante variable, ya que pese a que se han realizado investigaciones y trabajos en el área de ingeniería en aras de construir instrumentos óptimos para su monitoreo, los resultados obtenidos no han sido satisfactorios, por lo cual esta entrada (lluvia horizontal) no fue incluida dentro del balance hídrico. Finalmente, en el balance hídrico de la cuenca del río Claro, se puede observar claramente la relación y coherencia entre la lámina de agua y las precipitaciones menos la evapotranspiración, aunque con leves diferencias entre unos años y otros, lo cual podría deberse al efecto, no considerado, de la precipitación horizontal, o a errores en la estimación de la evapotranspiración mediante el método empírico de Penman-Monteith.

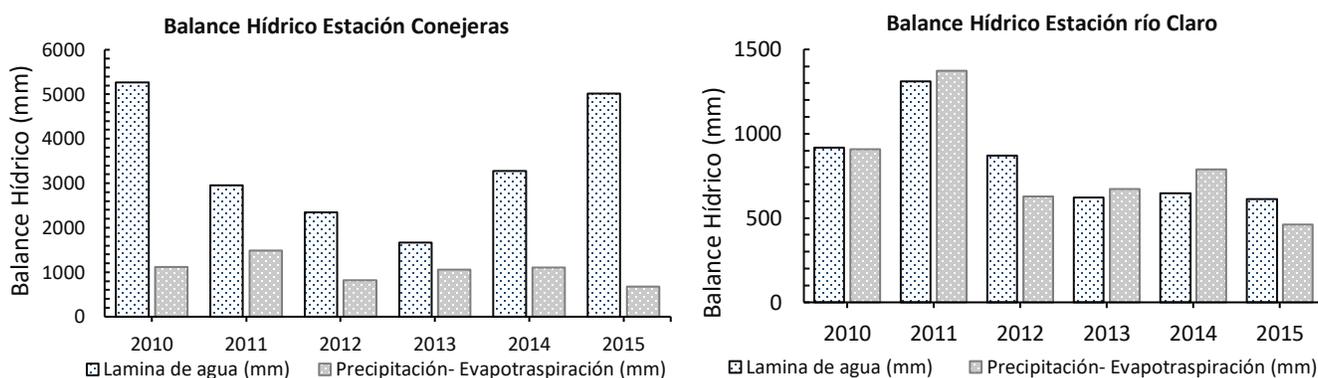


Figura 34. Balance hídrico de las subcuencas ubicadas en la cuenca del río Claro. Elaboración de los autores

La figura 35, tabla 10, muestran el caudal medio y específico mensual, de las subcuencas de estudio, donde es posible observar la variabilidad mensual de los caudales y su rendimiento

hídrico, el cual cambia de acuerdo a la temporada (seca o húmeda). Uno de los problemas derivados del mal cálculo de los caudales en el páramo y el bosque altoandino, es que no ha sido posible estimar el peso relativo de cada uno de los ecosistemas en la producción hidrológica de la cuenca (de ahí los huecos en la tabla 10). Se trata de una pregunta de investigación de gran importancia, y resolverla es uno de los retos que tenemos en investigaciones próximas. Mediante el conocimiento del caudal aportado por cada sistema, y el área que representa el sistema dentro de la cuenca se podrá conocer en términos relativos, la importancia hidrológica del glaciar, el páramo y el bosque altoandino, y si ésta ha variado a lo largo de los años, o varía de temporadas húmedas a temporadas secas. La generación de curvas de gasto de calidad será imprescindible para realizar estas estimaciones con rigor científico.

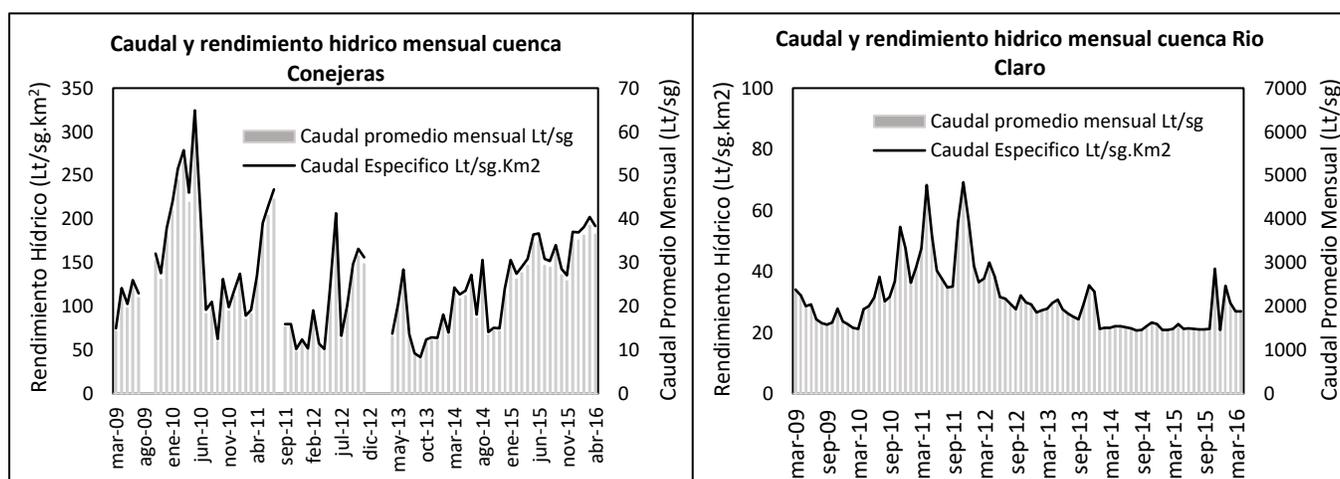


Figura 35. Caudal y rendimiento hídrico subcuencas de estudio. Elaboración de los autores.

Tabla 10. Resumen comportamiento hídrico subcuencas de estudio

Subcuenca	Ambiente	Área en %	Caudal medio (Lt/seg)	Rendimiento hídrico (Lt/seg*km ²)	Promedio Aporte hídrico anual a la cuenca (%)
Conejeras	Glaciar	0.27%	24,81	130	1.1
Sietecuerales	Páramo	5.8%	-	.	.
San Antonio	Bosque Alto andino	1.2%	.	.	.
Río Claro	Cuenca alta montaña	100%	2161	30	-

Fuente: elaboración de los autores

De acuerdo con los resultados anteriormente descritos es preciso señalar que, a pesar de que desde el año 2006 en el marco del Proyecto Integrado de Adaptación Nacional para el Cambio Climático (INAP), se comenzó a gestar la idea de generar medidas de adaptación al cambio climático en la alta montaña colombiana y se aunaron esfuerzos para instrumentalizar dos cuencas hidrográficas (Cuenca del río Claro y cuenca Calostros), con el fin obtener datos en tiempo real sobre variables hidrometeorológicas y glaciológicas, para la optimización del conocimiento sobre los ecosistemas y el ciclo del agua en la alta montaña. En la actualidad, no se le ha dado continuidad a dicha iniciativa, lo cual se ve reflejado en la manifiestamente mejorable calidad de los datos hidrometeorológicos y la ausencia de curvas de gasto, que imposibilitaron en el presente estudio, la generación de análisis robustos y confiables sobre el comportamiento hidrológico de cada uno de los ecosistemas de la alta montaña. Es importante tener en cuenta que, si bien la presente investigación se constituye en un estudio pionero sobre el análisis del comportamiento hidrológico a partir de series de datos de tres subcuencas con control hidrométrico que representan los tres ecosistemas de la alta montaña, las conclusiones extraídas del mismo, son dependientes de la calidad de los datos y de las curvas de gasto utilizadas y como tal se deben considerar con precaución.

Estudios realizados en Colombia sobre los efectos potenciales del calentamiento global en el régimen hidrológico en la alta montaña son casi ausentes y los realizados no presentan resultados contundentes dada la mala calidad de los datos hidrológicos. Sin embargo, Pérez et al (1998) e IDEAM (2010), sustentan que existe una tendencia hacia la disminución de los caudales. Así mismo, Ruiz et al. (2011), en un estudio que realizaron en la cuenca del río Claro en Caldas Colombia, encontraron una disminución de las caudales superficiales provenientes de zonas de alta montaña e importantes repercusiones en el balance hidrológico atribuidos al estrés climático al que está sometido el ecosistema de páramo. En el mismo estudio, registros históricos medios y máximos anuales de las cuencas hidrográficas de los Ríos Otún y Chinchiná demostraron tendencias decrecientes, aunque no son significativas estadísticamente con un 95% de confianza. Los registros de caudales mínimos en los meses más secos del año mostraron tendencias decrecientes y estadísticamente significativas con un 95% de confianza. Este planteamiento se contradice con lo expuesto por Harden (2006) quien asegura que uno de los impactos más generalizados en el sistema fluvial en los Andes es el aumento de la lluvia que llega a los ríos como escorrentía superficial, la erosión y el

movimiento de sedimentos, lo que es consecuencia no solo del cambio climático, sino además de actividades antrópicas tales como la agricultura, la ganadería, la urbanización y la minería.

Por otro lado, Fonseca (2005), argumenta que uno de los mayores impactos del cambio climático sobre la Alta Montaña será la reducción de la potencialidad de capturar un volumen considerable de agua representado en la precipitación horizontal, lo que se complementa con el planteamiento de Föster (2001), quien asevera que cambio climático generará un efecto negativo sobre los bosques altoandinos al elevar el nivel base de las nubes, lo que hace que se pierda el contacto entre éstas y las montañas (Lawton et al., 2001). Así, desaparece el efecto de la niebla sobre el ciclo hidrológico de estos ecosistemas, pero, además, aumentará la evapotranspiración debido a una mayor insolación. Atendiendo a este panorama, a continuación se discuten de manera detallada los resultados de cada una de las subcuencas de estudio que representan los ecosistemas de la alta montaña altoandina.

En la cuenca Conejeras, la cual drenan las aguas provenientes del glaciar y representa el 0.27% del área total de la cuenca del río Claro, se observó una estrecha relación entre la temperatura y la generación de caudal diario (figura 30), lo que se ajusta con lo planteado por el IDEAM (2012), quien sustenta que los caudales provenientes de la fusión glaciar tienen una variabilidad diaria, íntimamente relacionada con la temperatura y la incidencia de la radiación solar. Por ejemplo, durante un ciclo diario el caudal experimenta un incremento entre las 11 a las 16 horas, donde alcanza su pico; por su parte, la temperatura presenta su mayor incremento entre las 10 a las 15 horas del día, lo que indica que el caudal de fusión no presenta una respuesta inmediata al cambio de temperatura, en razón a que la masa de hielo necesita cierta cantidad de energía para alcanzar el punto de fusión (IDEAM, 2012). Dicho comportamiento es diferenciado en las temporadas secas y húmedas y depende en gran medida de las condiciones en que se encuentre el glaciar. Si este posee un espesor significativo de la cobertura de nieve, el valor del albedo será alto y por lo tanto la radiación incidente se reflejará, comportándose la nieve como un aislante térmico. Es decir que si un glaciar posee poca o nula cobertura de nieve reducirá su albedo, lo cual lo puede conllevar a sufrir fuertes procesos de ablación. Es importante resaltar que los procesos meteorológicos y micrometeorológicos que gobiernan el comportamiento glaciar son complejos y dependen

de numerosas variables tales como la radiación, nubosidad, humedad relativa y vientos, o en el caso del glaciar que nos ocupa, cantidad de ceniza en superficie (IDEAM, 2012).

El presente estudio también evidenció una variabilidad estacional mensual bien definida de los caudales provenientes de la fusión glaciar. Durante la temporada seca las precipitaciones se reducen conllevando a la disminución del espesor de la nieve y aumento de los procesos de ablación, convirtiendo a los glaciares en importantes fuentes de escorrentía superficial en la alta montaña (Sémiond, et al., 1998, Francou, et al., 2000). Por el contrario durante las temporadas húmedas, donde la precipitación en estado sólido aumenta y el glaciar disminuye sus procesos de ablación, se ocasiona una disminución de los aportes de escorrentía superficial (IDEAM, 2012), no obstante la presente investigación evidenció que cada vez, los eventos de precipitación sólida son menos frecuentes, de hecho desde el año 2013 dichos eventos han disminuido considerablemente. Así mismo, se observó una relación de los aportes de escorrentía superficial con los fenómenos climáticos ENSO. Durante los fenómenos climáticos “El Niño” 2009-2010, 2015-2016, la escorrentía superficial aumentó, y durante el fenómeno “La Niña” 2011, disminuyó formidablemente. Esto concuerda con el planteamiento de IDEAM, (2012) y Ramírez (2008), quienes replican que durante los fenómenos climáticos extremos “El Niño” los glaciares de los Andes tienen impactos dramáticos en el balance de masa a consecuencia del déficit de precipitación lo que provoca una cobertura de nieve menos abundante induciendo a una radiación solar mejor absorbida y el consecuente derretimiento de los glaciares, convirtiéndolos en su totalidad en sistemas de ablación. Contrario al fenómeno climático “La Niña” donde aumentan las precipitaciones sólidas, y pese a que los glaciares no dejan de perder masa, por el continuo calentamiento atmosférico, si disminuyen sus pérdidas considerablemente, lo que se ve reflejado en la disminución de los valores de escorrentía superficial. El presente estudio, pudo determinar además, que para el periodo de 2010 – 2015, la subcuenca Conejeras presenta un caudal promedio de 24.81 Lt/seg, con un rendimiento hídrico en promedio de 130 Lt/seg*km² Lo que guarda coherencia con lo argumentado IDEAM (2012) que reporta un caudal promedio de 20Lt/seg para el periodo de 2008-2012 con un rendimiento hídrico de 118 Lt/seg*km², estos valores aumentaron ligeramente probablemente por la incidencia del fenómeno El Niño 2015-2016, donde el glaciar aumentó significativamente sus aportes hídricos, ocasionado un aumento en los promedios históricos. Cabe resaltar que al comparar los aportes hídricos del

glaciar con lo de la cuenca del Río Claro, se puede afirmar que la producción neta en km² triplica la producción neta de la cuenca, lo cual se prevee que no durará mucho tiempo dado su reducido tamaño y condición extremadamente vulnerable. El porcentaje de aportes hídricos anuales de la subcuenca Conejeras a la cuenca del río Claro para el periodo de estudio (2010-2015) en promedio corresponde al orden de 1.1%

En conclusión, la cuenca Conejeras, durante las temporadas secas tiene su mayor rendimiento hídrico, realizando aportes significativos al ecosistema páramo, provenientes de la ablación glaciar. Sin embargo, tal y como se presentó en el aparatado de la dinámica glaciar, el volcán nevado Santa Isabel está presentando fuertes procesos de ablación que se reflejan en su disminución de área, volumen y masa; De continuar las actuales condiciones climáticas se espera que en el transcurso de 10 años desaparezca (IDEAM, 2016). Esto podría generar cambios en los ecosistemas situados en las partes bajas, si se tiene en cuenta que los glaciares cumplen un papel importante dentro de la meteorología del sistema de la alta montaña, ya que, gracias a sus condiciones termodinámicas, aporta enfriamiento a las masas de aire y aumento de la humedad relativa, favoreciendo las precipitaciones y generando condiciones ambientales específicas para la fauna y flora que coronan las altas cumbres. En este sentido la desglaciación propiciaría un ambiente más seco, que causaría una aceleración en los procesos de descomposición de materia orgánica afectado los flujos de carbono y por ende la estructura y porosidad de los suelos de páramo así capacidad regulatoria. Adicionalmente, las turberas se verían fuertemente impactadas, ya que como argumenta Benavides (2013), ya que durante las temporadas secas cerca del 80% del agua de escorrentía de estos ecosistemas, proviene de los glaciares, los cuales realizan un suministro de agua elevado durante todo el año favoreciendo el crecimiento de las plantas en su interior y previniendo la exposición del subsuelo a las altas concentraciones de oxígeno en la atmósfera. Cabe señalar que estos ecosistemas desempeñan un papel fundamental en la alta montaña al almacenar excepcionales cantidades de carbono que traducen en una alta capacidad para retener y acumular grandes cantidades de agua. Estos ecosistemas almacenan un 10% del agua dulce mundial y pueden acumular hasta 35 veces su peso en agua, que es liberada a las corrientes cercanas de manera gradual previniendo sequías, aumentando flujo base o crecientes de los ríos (Benavides, 2013). Así pues, se hace necesario generar estudios científicos donde se realicen proyecciones, escenarios y se evalúen el impacto que tendrá para la alta montaña la

extinción de esta masa de hielo en su estacionalidad e incidencia de los fenómenos climáticos ENSO, así como la colonización del páramo en el piso geomorfológico Periglaciario, con el fin de generar inactivas que permitan responder anticipadamente a los cambios que suponen cada uno de estos sistemas.

En cuanto a la subcuenca Sietecurales que posee un área del 5.8% total de la cuenca del río Claro y registra los aportes hídrico provenientes del ecosistema páramo, se evidenció la existencia de un aporte hídrico casi constante con un valor de caudal base que aumenta ligeramente en la medida que se presentan los eventos de precipitación. Esta serie de datos a diferencia de la subcuenca Conejeras, no presenta una variabilidad estacional mensual bien definida, ya que aporta agua de manera constante durante todo el año. No obstante, sí revela una diferenciación en los aportes durante los fenómenos climáticos ENSO. Por ejemplo, en el fenómeno climático El Niño 2015-2016, se denota claramente un aumento en su nivel base con respecto al histórico y un aporte constante de agua al bosque Altoandino a pesar de la sequía y el intenso aumento de temperatura a la que estuvo expuesto.

A nivel internacional existe un consenso sobre la importancia de los páramos en la alta montaña, siendo considerados como los principales proveedores de agua en la cordillera de los andes y especialmente en países como Venezuela, Colombia y Ecuador. Su calidad del agua es excelente, y los ríos que descienden desde este, proporcionan un flujo de base alto y sostenido (Buytaert, et.,al 2004). Pese a que son pocos los estudios enfocados a caracterizar la capacidad y regulación hidrológica del páramo, existe una aceptación de la comunidad científica sobre la generación de un caudal constante por parte de este ecosistema a lo largo del año (Luteyn, 1992). Investigaciones como la realizada por Buytaert, et al.,(2004), donde analizaron el volumen de descarga de una cuenca de páramo natural y una cultivada, encontraron un pico de flujo base para las dos cuencas, dicha capacidad de regulación se debe en gran medida a los suelos, los cuales son en su mayoría de origen volcánico. Estos forman una capa uniforme sobre el lecho de la roca terciaria que pueden llegar a tener desde unos pocos centímetros hasta varios metros de espesor, lo que influyen en los procesos hidrológicos mediante la creación de tasas de percolación lentas (Roa-García, et al., 2011). Adicionalmente el clima frío y húmedo al que están expuestos, propicia una resistencia a la descomposición microbiana generando suelos oscuros con alta concentración de materia

orgánica, húmicos y con una estructura porosa significativa (Sauer 1957, Colmet-Daage, et.,al 1967, Barberi, et al.1988). Buytaert, et al., (2005) estiman que la retención y capacidad de almacenar grandes cantidades de agua del páramo se debe en gran medida al alto predominio de microporos en el suelo, dichas cantidades de agua permanecen inactivas por determinados periodos de tiempo, es decir que no realizan aportes al ciclo hidrológico de manera inmediata. Esto se evidenció claramente en la presente investigación; Por ejemplo, durante el fenómeno climático La Niña 2010-2011 el aporte de escorrentía superficial (Figura 35) no aumentó de manera drástica en el ecosistema Páramo pese a las fuertes precipitaciones que se presentaron. Según Crespo, et al (2014), durante las lluvias intensas el caudal del ecosistema páramo está dominado por flujo lateral a través de la capa de raíces localizada en la parte superior del horizonte orgánico del suelo y del agua proveniente de las zonas saturadas o de estancamiento. Este último en forma de caudal directo. Por otra parte, durante el fenómeno climático El Niño mantuvo un aporte hídrico constante, comportándose como un tampón hidrológico al amortiguar fuertes precipitaciones y evitar fuertes estiajes. Al respecto Crespo, et al (2014) sustenta que durante condiciones secas el flujo lento es controlado por el flujo lateral a través del horizonte C y las grietas en la capa superficial de la roca meteorizada. Esto quiere decir que cuando el suelo se encuentra más seco dichas capas contribuyen a la generación de caudal predominantemente correspondiente al llamado “flujo base” o de verano. Aparentemente el agua subterránea no contribuye a la generación de caudal, no obstante, los estudios en este campo son muy limitados por lo que esta afirmación no ha logrado demostrarse.

Por otra parte, el balance hídrico, de esta subcuenca, presentó una diferencia significativa entre las entradas y las salidas. Lo cual se explica por un error en la estimación de las curvas de gastos y porque el presente estudio no incluyó como una entrada al sistema hidrológico la variable de precipitación horizontal dado que en la zona de estudio no hay instrumentación destinada a este fin. Al respecto Buytaert, et al., (2006), sostiene que la precipitación debido a la niebla, el rocío y la interceptación de la vegetación añade una cantidad de agua desconocida al sistema hidrológico de la alta montaña y más específicamente al ecosistema páramo y bosque altoandino. Investigaciones realizadas han señalado que dicha cantidad corresponde al 20% de la precipitación total (Bruijnzeel & Proctor, 1995, Díaz & Suárez, 2006). No obstante, no ha sido posible lograr la extrapolación

de estos resultantes a condiciones naturales, asimismo no existe un método estándar para estimar la interceptación de niebla, la cual depende de la altura de la vegetación, estructura de la cubierta, tamaño, la biomasa, la orientación y las características físicas de las hojas y epifitas (Gonzalez, 2000). Otro aspecto importante a discutir en los resultados del balance hídrico es el cálculo de la evapotranspiración, ya que como argumenta Buytaert, et al. (2006), la vegetación del páramo se caracteriza por tener una evapotranspiración baja y pese a que se han aunado esfuerzos para cuantificar esta importante variable los resultados son propensos a incertidumbres. La mayoría de estudios, así como la presente investigación se basan en la ecuación de Penman-Monteith. Si embargo, García (2004) sostiene que, la validez de este método en zonas altas es cuestionable, puesto que las propiedades de transpiración particulares de la vegetación de páramo y bosque altoandino han sido poco estudiadas, por lo cual, sería un desacierto generalizar en la estimación evapotranspiración en estos excepcionales ecosistemas.

Los resultados anteriormente descritos manifiestan la importancia del ecosistema Páramo húmedo en la alta montaña, como un sistema regulador que provee constantemente de agua al bosque Altoandino, en razón a su capacidad retenedora de agua citada con anterioridad. Aspecto esencial durante las temporadas secas, al constituirse en un importante aportante de agua, atenuando posibles impactos sobre los cuerpos hídricos primordiales para la ecología de las especies animales, vegetales y para el bienestar humano. Cabe mencionar que la reveladora producción de agua en los páramos se debe principalmente a una alta cantidad de precipitación distribuida en el tiempo de una forma uniforme. Por otra parte, la capacidad de regulación y almacenamiento agua se explica por la topografía, vegetación y en mayor medida por la estructura y característica del suelo (Crespo, et al., 2014).

Investigaciones enmarcadas en vislumbrar los posibles efectos del cambio climático en la alta montaña sustentan que, tras el sucesivo aumento de las temperaturas, corroborado en el presente estudio, y la posible disminución de las precipitaciones (Pabón, 2012), se espera un desplazamiento de los bosques de niebla hacia mayores altitudes, resultando en la disminución de este importante ecosistema. No obstante, tal y como se mencionó con anterioridad los afloramientos rocosos ubicados en la cuenca del río Claro, están siendo colonizados por vegetación propia del ecosistema páramo, fenómeno que está aún por

estudiarse. Tal vez uno de los mayores impactos en el ecosistema páramo atribuido al incremento de la temperatura y la consecuente extinción glaciaria sería la generación de un clima más seco, que aumentaría la estacionalidad y precipitaría los procesos de descomposición de materia orgánica (Waddington & Roulet, 2000, Poulénard et al., 2002 & Poulénard, et al., 2004); lo que se vería reflejado en una afectación del contenido de carbono orgánico, la estructura y porosidad del suelo y por ende en un aumento en los procesos de erosión y la disminución en capacidad de retención de agua de este ecosistema. Todo esto ocasionaría una escorrentía superficial mucho mayor a la evaluada. En conclusión, la mayor afectación del ecosistema páramo se asocia con capacidad de regulación hídrica en menor grado a la cantidad de agua que sale de la misma (Crespo, et al., 2014).

Cabe señalar que tal y como sustenta Buytaert et al (2006), los impactos del cambio climático en el ecosistema páramo son irrelevantes comparados con los cambios generados por actividades antropicas, tales como los cambios en los usos del suelo o el cambio en las coberturas vegetales y quemadas. No obstante, estos últimos tienen soluciones de mitigación más factibles dada su naturaleza a escala regional, contrario al cambio climático el cual es un fenómeno que responde a actividades de escala global. En este sentido, es importante aunar esfuerzos enfocados en la generación de iniciativas de mitigación y adaptación tanto para el cambio climático, así como para el cambio producido a escala local por las actividades antropicas. Para el caso específico de la cuenca del río Claro el ecosistema páramo se encuentra “Protegido” con la figura de Parque Nacional Natural. Sin embargo, este páramo posee una fuerte presión debido a las actividades ecoturísticas que se realizan en la zona, al generar pisoteos constantes que afectan la fauna y flora. Adicionalmente, No existen estudios de capacidad de carga del ecosistema, por lo cual no hay una regulación de los visitantes al parque. Una de las grandes deficiencias encontradas durante el presente trabajo, es la frágil y desinteresada institucionalidad ambiental y la ausencia de capital humano que apoye procesos de investigación rigurosos enfocados a comprender el ciclo hidrológico en la alta montaña, lo que a su vez se ve reflejado en la regular calidad de datos hidrometeorológicos que impiden análisis robustos tales como modelaciones hidrológicas o proyecciones de escenarios futuros. Habría entonces que fortalecer la capacidad para la recolección, almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos, a fin de generar información

confiable para la toma de decisiones en diferentes sectores y a escala, regional, nacional e internacional.

La subcuenca San Antonio posee un área de 1.2% del total de la cuenca del río Claro y es en donde drenan aguas provenientes del bosque Altoandino. Esta tiene un comportamiento hidrológico diario similar al páramo. Su variación estacional es más acentuada, presentando cambios significativos en sus aportes hídricos durante la temporada seca y húmeda. Asimismo se evidenció que este ecosistema es muy vulnerable al fenómeno climático ENSO, el cual impacta fuertemente su comportamiento hidrológico. Por ejemplo, durante los fenómenos climáticos El Niño 2009-2010 y 2015-2016, disminuyó significativamente sus aportes hídricos, contrario a los eventos climáticos La Niña 2011, donde tuvo un aumento considerable y picos muy acentuados de sus aportes hídricos diarios. Herzog, et al., (2010) señala que los bosques de niebla o altoandinos son muy sensibles a los cambios de humedad y temperatura llegando incluso en un episodio de sequía a ocasionar un elevada mortalidad vegetal. En este sentido, de continuar los eventos climáticos ENSO, el bosque Altoandino podría sufrir fuertes impactos en su composición biótica y abiótica. Por otra parte, en el balance hídrico se encontró una diferencia atípica entre los valores de entrada (precipitación) y escorrentía superficial. Lo que se podría explicar, al igual que en el ecosistema páramo, por un error en la estimación de las curvas de gatos que están sobreestimando los valores de caudal y por la no inclusión de la variable de precipitación horizontal, en el balance hídrico, que para este caso en especial, es particularmente importante debido a que como lo reporta la literatura, los bosques altoandinos o también llamados bosques de niebla, tienen una producción hidrológica bastante alta, en razón a la intercepción de las nubes, la precipitación horizontal y el bajo consumo de energía (Buytaert, et al., 2006, Bruijnzeel & Proctor, 1995). Conjuntamente el valor de evapotranspiración potencial calculado en el presente estudio, al no contemplar la vegetación propia del ecosistema en cuestión, cuyas características son particulares a las presentadas en otros ecosistemas pudo haber sobrestimado los valores (Gonzalez, 2000).

A nivel internacional existe in consenso sobre el excelente redimiento hídrico del bosque Altoandino en el ciclo hidrológico. Pizarro, et al., (2006), sustenta que la presencia constante de niebla en los bosques Altoandinos, produce una reducción de la radiación solar incidente

y un aumento de la humedad relativa, lo que resulta en menor pérdida por evapotranspiración. Asimismo, el contacto constante de los árboles de gran dosel característicos de este ecosistema, con las nubes produce una mayor interceptación y por ende una mayor entrada de agua al sistema, dando como resultado significativos rendimientos hídricos (Rolando & Jan, 2009). Se estima que una de las mayores bondades de este ecosistema es su potencialidad en la interceptación de neblina, además de su poder regulador (Fonseca & Ataroff, 2007). Conjuntamente Bruijnzeel, et al. (2006), expone que la fuerte presencia de niebla que cubre los bosques Altoandinos, disminuye la evapotranspiración produciendo un mayor caudal en relación con las entradas de precipitación. El alto rendimiento hídrico de los bosques altoandinos están relacionados con una serie de procesos que traducen en una mayor proporción de caudal con respecto a las entradas de precipitación. Estos procesos responden a condiciones climáticas (baja temperatura, alta humedad relativa en forma permanente, dosel permanentemente húmedo) y bióticas (presencia de epífitas y capa gruesa de briofitos en la superficie del suelo, horizontes orgánico bien desarrollado y suelos saturados, entre otros) (Tobón, 2009).

Los posibles impactos del cambio global, sobre el bosque Altoandino también se han documentado. La ganadería y agricultura intensiva, además del aprovechamiento forestal están generando una presión sobre este ecosistema y el ciclo del agua, que se refleja en una disminución de la humedad relativa, cambios en la estructura del suelo, así como el aumento de la escorrentía y la erosión (Buytaert, et al., 2006). Cabe señalar que los bosques Altoandinos desde hace más de 500 años han sido escenario de talas masivas, introducción de especies exóticas y cambios en los usos del suelo, lo que han conllevado a una disminución en la interceptación de lluvias, la infiltración, evapotranspiración y aumento de escorrentía superficial (Harden & Mathews, 2000). En cuanto al bosque altoandino presente en la cuenca de estudio, como se describió con anterioridad, está siendo fuertemente impactado por los campesinos, quienes para abastecer sus necesidades básicas talan el bosque para obtener leña que utilizan como combustible. Asimismo la ganadería intensiva está generando la compactación de suelo y formación de terracetas, traducido en la erosión del suelo, pérdida de la cobertura vegetal, así como de la infiltración y capacidad de interceptación. Así pues, toma sentido, continuar con la instrumentalización y estudio de este importante ecosistema, a fin de atender a la ausencia de conocimiento frente a su comportamiento hídrico y su

importancia dentro del sistema de la alta montaña. Conjuntamente se hace necesario implementar medidas de gestión eficaces para su preservación y conservación frente a la gran problemática medio ambiental que lo atañe, como es el caso del cambio global.

La microcuenca del río claro, a pesar de guardar una similitud con el comportamiento hidrológico del páramo y el bosque altoandino, no posee una estacionalidad visible, presentando un nivel base de aporte de agua que no aumenta ni disminuye significativamente ante eventos climáticos extremos. Llama la atención que durante los fenómenos climáticos El Niño 2009-2010, 2015-2016, los aportes de agua se mantuvieron constantes con respecto al histórico y durante el fenómeno La Niña, pese a presentar una variación de los aportes hídricos, estos no son tan acentuados como en el bosque Altoandino y el ecosistema páramo. Este fenómeno se puede explicar por el papel hidrológico que cumplen los ecosistemas presentes en la cuenca. El glaciar en temporadas secas es más susceptible aumentando considerablemente sus procesos de ablación y aporte de agua al páramo. Por su parte, el páramo regula los aportes hídricos ya que gracias a su capacidad de almacenamiento de agua, permanece en estado de saturación o emisaturación lo que hace que bien por flujos subsuperficiales o por flujo hortoniano, produzca agua constantemente, siendo esta característica de gran importancia durante las temporadas secas. Finalmente, el bosque altoandino se considera un importante productor de agua durante periodos sin variabilidad climática extrema, tiempo en el cual drena agua continuamente y en un alto porcentaje. El balance hídrico de esta cuenca presentó coherencia con los valores de entrada y salida. Su caudal promedio para el periodo de 2010- 2015 fue de 2161 Lt/seg, con un rendimiento hídrico del 30 Lt/seg*km² (58.3hm³). Con acuerdo con el IDEAM, 2012 y una escorrentía superficial promedio de 830mm.

8.4. Recomendaciones para la adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana.

Una vez analizados los aspectos relacionados con la normatividad a nivel local, nacional e internacional tanto de la gestión al cambio climático, como la alta montaña y estudiar en profundidad los aspectos socioeconómicos y biofísicos de la cuenca del Río Claro, se procedió a establecer recomendaciones para adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña colombiana. Para ello, se conceptualizó en torno a la adaptación, mitigación

y cambio climático, se analizaron en detalle los resultados obtenidos en cada uno de los aspectos evaluados a fin de resaltar vacíos, necesidades y potencialidades y, se profundizó en el análisis acerca de cómo estos aspectos se relacionan en términos de estrategias de adaptación y mitigación, realizando un análisis transversal acerca de posibilidades de éxito, institucionalidad, instrumentos, recursos necesarios y certidumbre e incertidumbres de su aplicación a la gestión de la cuenca.

La adaptación y mitigación al cambio climático es hoy por hoy, uno de los aspectos más tratados por las sociedades humanas y la comunidad científica. Esta gran problemática ambiental se ha convertido en una amenaza creciente para todas las poblaciones, sistemas naturales e industrias. Los esfuerzos orientados a su comprensión y estudio, así como a su mitigación y adaptación desde el orden tecnológico, social, económico y medioambiental, se han multiplicado. No obstante, las iniciativas adelantadas a nivel local, nacional e internacional, han resultado en medidas poco eficaces y sin resultados trascendentales; probablemente porque el cambio climático se constituye en un fenómeno gradual y estocástico que depende de diferentes factores que interactúan y se interrelacionan de manera compleja por largos periodos de tiempo. Responder a estos cambios implicaría entonces, generar acciones a corto, mediano y en mayor medida, largo plazo; en donde las poblaciones humanas, principales usuarios y administradores de los recursos naturales se comprometieran a gestionar y hacer un uso sostenible y eficaz de estos, como un fidecomiso, puesto que, dada la complejidad de los sistemas naturales y su respuesta ante cambios o transformaciones, se podría suponer que las acciones adelantadas para su mitigación y adaptación, tengan incidencia sobre la estructura ecológica luego de varios periodos de tiempo. Es así como las medidas de adaptación y mitigación intuyen gran incertidumbre en su eficacia, dado que obedecen a la compleja interacción e interrelación de las condiciones biofísicas y sociales (IDEAM, 2011).

En la cuenca del río Claro, se denotó que, pese a que la institucionalidad ha aunado esfuerzos para estudiar la excepcional oferta de servicios ecosistémicos que ostenta la cuenca, así como su deterioro ambiental, ocasionado en gran medida por las actividades antrópicas; Estos esfuerzos no han tenido resultados notables dentro de la gestión ambiental, propiciando que los ecosistemas de la alta montaña sean cada vez más susceptibles y menos resilientes al cambio climático. Por otra parte, la gestión al cambio climático dentro de los instrumentos

de planificación tales como el Plan de Desarrollo del Municipio, el PBOT, el POMCA, y El Plan de Manejo de Parques Nacionales es inexistente, lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad de los ecosistemas naturales y sociales. En términos institucionales, los pobladores de la cuenca solo legitiman la UAESPN, quien cumple un papel de informador y capacitador con respecto al manejo y uso eficiente en el Parque. Entidades como CORPOCALDAS, IDEAM, Universidad Nacional de Manizales, Universidad del Valle y Conservación Internacional han realizado trabajos de investigación en la zona, tendientes a caracterizar, pero no gestionar. Adicionalmente, los escasos recursos económicos, de capital humano y tecnológicos dispuestos para el estudio y gestión de este importante sistema, son limitados, lo que obstaculiza el monitoreo de los factores bióticos y abióticos que componen cada uno de los ecosistemas de la alta montaña, propiciando un desconocimiento por parte de cada uno de los actores de la cuenca sobre la disponibilidad (oferta) y distribución (demanda), además de los usos del suelo desde una visión integral que contemple el aspecto ecosistémico (IDEAM, 2011).

Ante este panorama, se hace necesario fortalecer la institucionalidad y los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial, ya que como argumenta Gross (1998) el ordenamiento y la planificación territorial rural se constituyen en una estrategia para detectar diversas problemáticas regionales o locales y formular orientaciones sobre su manejo. Del mismo modo, sería conveniente gestionar actividades transversales que articulen a los instrumentos de planificación como el POMCA del río Chinchiná, el PBOT del municipio de Villamaría, el Plan de Desarrollo del municipio de Villamaría, el Plan de manejo del PNNLN y el Plan de acción inmediato de la cuenca del río Claro en torno al uso sostenible y adaptación y mitigación al cambio climático, ya que como argumentan Ojeda y Arias (2000), las instituciones que se encargan de administrar y gestionar los recursos deben actuar en conjunto y del mismo modo coordinar sus actividades, articulando los procesos de planificación. Dichas actividades deberán tener alcance a corto mediano y largo plazo.

A nivel nacional se han implementado documentos tendientes a aportar en la inclusión de fenómenos climáticos en los instrumentos de planificación, tales como “Lineamientos para Incluir Cambio Climático en los Planes de Desarrollo de los Departamentos y Municipios de Colombia” y la “Hoja de Ruta para la Elaboración de los Planes de Adaptación Dentro del

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático”. En este sentido, sería indispensable el uso de estos documentos en la etapa de fortalecimiento de los instrumentos de planificación de la cuenca. Cabe señalar, que tal y como se concluyó en la presente investigación una de las principales limitaciones frente a la generación de propuestas de adaptación y mitigación al cambio climático en la alta montaña se concentra en la manifiestamente mejorable calidad de datos hidrometeorológicos, atribuida principalmente a fallos en los sensores que registran cada una de las variables y la ausencia de capital humano que apoye los procesos de monitoreo y genere información científica sobre la alta montaña colombiana. El fortalecimiento de la institucionalidad y los instrumentos de planificación, se traduciría en una gestión óptima, que contemple la existencia de personal capacitado y tecnología apropiada para la generación de un monitoreo continuo y permanente de los factores biofísicos de cada uno de los ecosistemas de la alta montaña, permitiendo comprender su comportamiento ante diferentes escenarios y responder anticipadamente a los cambios que supone el cambio climático. Al respecto Dourojeanni y Jouravlev (2002) aseveran que las instituciones deben promover mecanismos para divulgar la información comunicación y coordinación permitiendo que las personas que conozcan su realidad, se adapten a las diferentes estrategias y propuestas que se realizan, incluyendo las sugerencias aplicables y viables que la población lleve a la mesa de concertación.

Por otra parte, las poblaciones humanas asentadas en el área de estudio presentan un modelo de población disperso, la mayoría de los habitantes de esta zona son foráneos y se caracterizan por ser una población flotante, en razón a las precarias condiciones de vida de la cuenca. En general, las personas allí presentes trabajan bajo la modalidad de parcelación. El único servicio público que se posee en la zona es la energía, sin tener una cobertura total. No existe servicio de acueducto, (La captación del recurso hídrico se realiza por medio de mangueras sin ningún tipo de supervisión ambiental), alcantarillado ni aseo o centros de acopio, lo que hace a esta población muy vulnerable al consumo de agua, dado el arrastre de sedimentos y químicos procedentes del cultivo de papa y las aguas servidas. Cabe señalar que en un estudio de calidad de aguas realizado por CORPOCALDAS (2005) en la cuenca del río Claro se detectó presencia de Coliformes y metales pesados. Prieto (2008) reportó, que de acuerdo con las características actuales de la cuenca en terminos físicos, sociales y económicos, así como de las facilidades y dificultades en las medidas de adaptación, la

población de la cuenca del río Claro presenta un grado de vulnerabilidad medio, asociado principalmente a la precaria o inexistente infraestructura de servicios sociales y públicos, que convierte a los campesinos en población notablemente susceptible, dado que no cuentan con condiciones mínimas para lograr una adecuada calidad de vida. Esto convierte a la cuenca en un espacio “olvidado” y “marginal”, a pesar de su gran productividad (Prieto, 2008).

En términos del abastecimiento de agua, la baja densidad poblacional se puede contrastar con un drenaje y una disponibilidad de agua mucho mayor, lo que redundaría en una falta de conciencia colectiva sobre el suministro de la misma. Adicionalmente existe un escaso conocimiento acerca de la desglaciación y las implicaciones del cambio climático sobre los ecosistemas páramo, bosque altoandino, glaciar, y el recurso hídrico, lo que genera un desinterés por parte de la población campesina quienes al no sentirse susceptibles no se apropian de la problemática, dificultando la implementación de medidas adaptativas ante posibles transformaciones o conflictos por los impactos del retroceso glaciar en la disponibilidad hídrica.

Lo anterior evidencia la necesidad de mejorar las condiciones de vida de las poblaciones asentadas en la cuenca del río Claro, en términos de infraestructura en los aspectos de educación, salud y vivienda, a fin de evitar la movilización constante de los habitantes de la cuenca y con ello, apoyar procesos educativos que conlleven al entendimiento de las implicaciones del cambio climático en la alta montaña colombiana y los sistemas productivos, además de construir una identidad frente a su territorio. Así mismo, se deberá garantizar la construcción de viviendas dotadas de los requerimientos necesarios para lograr una buena calidad de vida, tales como acueductos veredales, plantas de tratamiento de aguas, servicios de luz y gas. En cuanto al financiamiento se podrían contemplar diferentes formas de recaudo tales como tasas por uso de agua, por vertimientos o pago por servicios ambientales. Estas herramientas deberán ser establecidas a partir de un análisis detallado de las condiciones socioeconómicas y percepciones de los habitantes de la cuenca. Del recaudo obtenido de la aplicación del cualquiera de los instrumentos económicos citados, se deberá destinar un porcentaje a la conservación de la cuenca. Lo que propenderá una importante contribución a la restauración, protección y conservación de la alta montaña (Lleras, 2000).

En cuanto a la vulnerabilidad de los ecosistemas de la cuenca, la presente investigación evidenció un aumento irrefutable de las temperaturas máximas y mínimas en los últimos treinta años, además de un derretimiento acelerado de la masa glaciar, el cual es el ecosistema con mayor vulnerabilidad frente cambio climático. Contrario a la actividad antrópica, la cual no tiene mayor implicación sobre su funcionamiento y estructura. Por otra parte, el ecosistema páramo está siendo fuertemente impactado en el área de estudio, dada la desmesurada e incontrolable actividad turística que se ha venido impuesto durante los últimos años. Esto ha ocasionado la generación de terracetos y cambios importantes en las coberturas vegetales de los senderos dispuestos para las actividades turísticas. Adicionalmente, se ha reportado la desecación de bofedales y turberas por parte de la población campesina con el fin de generar espacios para llevar a cabo actividades ganaderas. En cuanto a los posibles impactos del cambio climático, se provee que se generen cambios en la estructura y funcionamiento de los suelos, lo que podría resultar en una disminución de la regulación hídrica y aumento de la escorrentía superficial. No obstante, dichos cambios serán graduales y necesitarán de largos periodos de tiempo. Tal vez uno de los ecosistemas más vulnerables a la actividad antrópica en la cuenca es el Bosque Andino, el cual se encuentra bajo la figura de Conservación y Producción forestal, lo que ha ocasionado que su uso del suelo se concentre en la explotación, con fuertes actividades ganaderas y de aprovechamiento forestal.

De acuerdo con lo anterior, de no tomarse medidas inmediatas, los impactos del cambio climático sumado a las actividades antrópicas que se realizan en la actualidad, podrían generar grandes afectaciones en la alta montaña y especialmente en el bosque Altoandino y el páramo, ecosistemas de vital importancia para el bienestar humano y el equilibrio ecológico dada su importancia en el ciclo hidrológico como reservorio y regulador y su alta diversidad biológica (FAO, 2002). El IPCC (2001) sustenta que la vulnerabilidad al cambio climático sera mayor en los sistemas hidricos mal administrados, que se encuentran bajo tensión o cuya ordenación es deficiente e insostenible, debido a que las políticas desalientan el uso eficiente del recurso, la protección de la calidad de agua y la inadecuada ordenación de las cuencas hidrograficas. En este sentido, es indispensable promover iniciativas en la cuenca alta del río Claro y a escala nacional que conlleven a la identificación de las responsabilidades institucionales, actores locales, necesidades de las comunidades, precepciones frente al cambio climático y el recurso hídrico para coordinar acciones y directrices que contribuyan

a una eficiente gestión ambiental y por ende una gestión al cambio climático. En conclusión, es preciso señalar que la eficiente gestión al cambio climático estará sujeta al papel de los diversos niveles de gobierno, es decir a la institucionalidad pública y el tipo de políticas que se generen para la gestión y consolidación tanto de un desarrollo sustentable como un desarrollo “climáticamente inteligente”, al papel de las organizaciones locales (instituciones públicas, actores privados y mixtos) y el nivel de coordinación que se pueda construir con las instituciones públicas. Estas organizaciones deben apoyar la interacción entre los agentes, la creación de nuevas instituciones vinculantes e instrumentos para que los diversos actores de un territorio desarrollen una capacidad de adaptación constante a los cambios continuos del medio biofísico, las tecnologías y los mercados, buscando la sustentabilidad de los recursos naturales y resiliencia de los ecosistemas. Para el caso específico del monitoreo de la alta montaña se recomienda la inclusión de una subcuenca hidrométrica en pastizal, con el fin de estudiar su comportamiento hidrológico y compararlo con las subcuencas páramos, bosque Altoandino y glaciar, además del monitoreo de los bofedales y las turberas en cuando a su comportamiento hidrológico, climático y biológico, ya que son escasas las investigaciones enfocadas a caracterizar su estructura y dinámica con otros ecosistemas en la alta montaña colombiana.

Finalmente, las practicas productivas y usos del suelo se deben implementar desde un enfoque ecosistémico, donde se conciba la cuenca como un sistema compuesto por una serie de unidades que al afectarse repercutirá en cada una de las partes. En este sentido se propone la generación de estrategias de conservación, recuperación y restauración desde la comprensión de los factores físicos, biológicos y sociales y la inclusión y participación de cada uno de los actores presenten en la cuenca (instituciones, campesinos, comunidades académicas, ONGs), que conlleve al desarrollo de metas propuestas, implementando la gestión conjunta (FAO, 2007) y trabajando por la región en una misma dirección, con el fin de aprovechar los recursos de manera sostenible y garantizando que éstos se preserven para las generaciones futuras.

9. Conclusiones

Los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial implementados en cuenca alta del río Claro, no han tenido resultados satisfactorios, dada la frágil institucionalidad, y desinterés por parte de las comunidades que habitan la zona, lo que ha generado que los ecosistemas presenten en la alta montaña sean cada vez más susceptibles y menos resilientes al cambio climático y las actividades productivas.

La población que habita en la cuenca alta del río Claro tiene un grado vulnerabilidad media, ya que, pese a que tienen gran oferta de servicios ecosistémicos, y un excepcional abastecimiento hídrico, poseen precarias condiciones físicas, sociales y económicas, además de las dificultades de adaptación que éstas presentan ante una transformación en su territorio. Sus condiciones sociales, el alto nivel de intervención en algunos predios, la utilización de agua de fusión glaciar y la importante producción económica, hacen de la cuenca sea un espacio altamente dinámico y sensible a cualquier cambio.

En la microcuenca del río Claro, predominan tres importantes usos del suelo: protección investigación y turismo en la parte alta de la cuenca con un porcentaje de 45.5% total de la cuenca y donde se encuentran el ecosistema páramo y los pisos geomorfológicos glaciar y Periglaciar; protección y producción de leña en la parte media y baja de la cuenca en un área del 14.7% total de la cuenca, donde se localizan los relictos de bosque Altoandino y producción ganadera y agropecuaria en cercanías a los relictos del bosque Altoandino y el ecosistema páramo con un porcentaje del 40% total de la cuenca. En este contexto, se concluye que los ecosistemas de la alta montaña están siendo fuertemente presionados por actividades productivas no planificadas ambientalmente. El páramo por el turismo y el bosque altoandino por el aprovechamiento forestal y las actividades agropecuarias.

las temperaturas máximas en la zona de páramo (4150 msnm) en la cuenca del río Claro, han aumentado en promedio 1.36°C con una variación anual en promedio de 0.04, y las temperaturas mínimas 0.60°C con una variación anual de 0.018°C . Es decir que las temperaturas medias durante los 32 años analizados han experimentado un incremento cercano a un 1°C con una variación anual de 0.03°C con un 95% de confianza.

El volcán nevado de Santa Isabel, está viviendo fuertes procesos de ablación que podría generar su extinción en un futuro no muy lejano. La variable que afecta en mayor medida el

derretimiento en es el fenómeno climático ENSO, se estima que la desglaciación podría afectar la esorrentía, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico, y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras.

El derretimiento glaciar podría generar cambios en los ecosistemas situados en las partes bajas, si se tiene en cuenta que los glaciares cumplen un papel importante dentro de la meteorología del sistema de la alta montaña, ya que, gracias a sus condiciones termodinámicas, aporta enfriamiento a las masas de aire y aumento de la humedad relativa, favoreciendo las precipitaciones y generando condiciones ambientales específicas para la fauna y flora que coronan las altas cumbres. En este sentido la desglaciación propiciaría un ambiente más seco, que causaría una aceleración en los procesos de descomposición de materia orgánica afectado los flujos de carbono y por ende la estructura y porosidad de los suelos de páramo y bosque altoandino, así como su capacidad regulatoria.

De no tomarse medidas inmediatas desde los instrumentos de planificación y la institucionalidad, los impactos del cambio climático sumado a las actividades antrópicas que se realizan en la cuenca del río Claro, podrían generar grandes afectaciones en la alta montaña y especialmente en el bosque Altoandino y el páramo, ecosistemas de vital importancia para el bienestar humano y el equilibrio ecológico dada su importancia en el ciclo hidrológico como reservorio y regulador y su alta diversidad biológica.

La gestión al cambio climático, debe abordarse de forma integral, dado que, en la dinámica propia del espacio geográfico, los procesos físicos, sociales y naturales y sus relaciones e interacciones son complejos y estocásticos. Tales procesos le imprimen una particularidad a cada territorio, por lo que sería incorrecto (y problemático) generalizar su análisis y sus formas de manejo. De igual forma, en el estudio de la adaptación y mitigación en la alta montaña se debe tener en cuenta la escala espacio-temporal de análisis, ya que los impactos derivados de la relación sociedad-naturaleza pueden originarse y reflejarse a nivel local, regional y/o global y a largo, mediano y corto plazo.

10. Recomendaciones

Se debe fortalecer la institucionalidad y los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial, además de gestionar actividades transversales que articulen a los instrumentos de planificación.

Para el caso específico del monitoreo de la alta montaña se recomienda la inclusión de una subcuenca hidrométrica en pastizal, además del monitoreo de los bofedales y las turberas en cuando a su comportamiento hidrológico, climático y biológico, ya que son escasas las investigaciones enfocadas a caracterizar su estructura, dinámica y participación dentro de los ecosistemas en la alta montaña colombiana.

Es imprescindible fortalecer las redes de monitoreo climático y el capital humano tendiente a estudiar la alta montaña, en aras de generar información científica con alta rigurosidad que sirva para la toma de decisiones frente a la gestión y adaptación al cambio climático.

Las practicas productivas y usos del suelo en la cuenca alta del río Claro se deben implementar desde un enfoque ecosistémico, donde se conciba la cuenca como un sistema compuesto por una serie de unidades que al afectarse repercutirá en cada una de las partes.

Es necesario mejorar las condiciones de vida de las poblaciones asentadas en la cuenca del río Claro, en términos de infraestructura, servicios públicos y sociales, a fin de evitar la movilización constante de los habitantes de la cuenca y con ello, apoyar procesos educativos que conlleven al entendimiento de las implicaciones del cambio climático en la alta montaña colombiana y los sistemas productivos, además de construir una identidad frente a su territorio.

En cuanto al financiamiento se podrían contemplar diferentes formas de recaudo tales como tasas por uso de agua, por vertimientos o pago por servicios ambientales. Estas herramientas deberán ser establecidas a partir de un análisis detallado de las condiciones socioeconómicas y percepciones de los habitantes de la cuenca. Del recaudo obtenido de la aplicación del cualquiera de los instrumentos económicos citados, se deberá destinar un porcentaje a la conservación de la cuenca.

11. Bibliografía

- Adam, J., Hamlet, A., & Lettenmaier, D. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological Processes*, 962–972.
- AndesPlus. (2012). *Metodologías para la formulación de Líneas de Base y Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Ecosistemas de Alta Montaña*. Bogotá D.C: Consorcio AndesPlus.Universidad de Zurich.
- Andrade, Á., & Navarrete, F. I. (2004). *Lineamientos para la Aplicación del Enfoque Ecosistémico a la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. México D.F.: Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental. N°8. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (PNUMA), Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Red de Formación Ambiental.
- Antarctic Glaciers. (13 de 12 de 2015). *Antarctic Glaciers Explaining the science of Antarctic Glaciology*. Obtenido de Antarctic Glaciers Explaining the science of Antarctic Glaciology: <http://www.antarcticglaciers.org/>
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. (2012). Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM . *Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales* .
- Barberi, Coltelli, Ferrara, Innocenti, Navarro, & Santacroce, R. (1988). Plio-quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125, 1–14.
- Barry, R., & Seimon, A. (2000). Climatic Fluctuations in the Mountains of the Americas and Their Significance . *Ambio*, 364-370.
- Benavides, J. C. (2013). Perturbaciones en las turberas de páramo: la acción del hombre y el clima. En MADS, & Humboldt, *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos* (págs. 81-89). Bogotá D.C: Intituto de Investigación y Recursos Biológicos Alexander Humboldt.
- Beniston, M. (2003). Climate change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 5–31.

- Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. In *Climate variability and change in high elevation regions: Past, present & future* . Springer Netherlands., 5-31.
- Berkes, F., & Floke, C. (1998). Linking Social and Ecological System: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. . *Cambridge University* .
- Berkes, F., Colding, J., & Floke, C. (2003). Navigating Socio-ecological system: Building Resilience for Complexity and Change, Cambridge. *Cambridge University Press*.
- Berryman, D., Bobee, B., Cluis, D., & Haemmerli, J. (1988). Nonparametric tests for trend detection in water-quality time series. *Water Resources Bulletin*, 24, 545-556.
- Bishop, J., & Landell-Mills, N. (15 de 11 de 2007). *Instituto Nacional de Ecología* . Obtenido de Instituto Nacional de Ecología : <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/503/cap2.html>
- Broecker, W. (08 de Agosto de 1975). Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? *American Association for the Advancement of Science*, 189(4201), 460-463.
- Bruijnzeel, & Proctor. (1995). Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? En Hamilton, Juvik, & Scatena, *Tropical montane cloud forests* (págs. 38–78.). New York: Springer-Verlag.
- Bruijnzeel, Burka, Carvaja, Fruma, Kohler, Mulliga, & Tobón. (2006). Hydrological impacts of converting tropical montane cloud forest to pasture with initial reference to northern Costa Rica. *Tech. Rep.*
- Buytaert, Bièvre, D., Wyseure, & Deckers. (2005). The effect of land use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19, 3985–3997.
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, D., & Cisneros, F. (2012). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Katholieke Universiteit Leuven.*, 1-26.

- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 108–114.
- Buytaert, W., Rolando, C., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *ScienceDirect*, 53–72.
- Ceballos, Euscategui, Ramirez, Cañón, Huggel, Haeberli, & Machguth. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*. *Annals of Glaciology*, 43, 194-201.
- Ceballos, J., Euscategui, C., Ramirez, Cañón, Huggel, Haeberli, & Machguth. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 194-201.
- Ceballos, J., Euscategui, J., Ramirez, M., Cañón, C., Huggel, W., Haeberli, & Machguth. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 43, 194-201.
- CEPAL. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. *Recursos Naturales e Infraestructura*, Número 47.
- Cleef, A. (1981). The vegetation of the Páramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Diss. Botan.* , 61-320.
- CMNUCC . (2012). *Resumen de la Conferencia sobre cambio climático de la CMNUCC en Doha, Qatar, 26 de noviembre al 7 de diciembre de 2012* . Obtenido de Resumen de la Conferencia sobre cambio climático de la CMNUCC en Doha, Qatar, 26 de noviembre al 7 de diciembre de 2012: http://www.undpcc.org/docs/UNFCCC%20negotiations/UNDP%20Summaries/2012_12%20December%20Doha/UNDP%20COP18%20summary_sp.pdf
- CMNUCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

- CMNUCC. (1999). *El Programa de trabajo de Nairobi*. Obtenido de El Programa de trabajo de Nairobi: https://unfccc.int/files/adaptation/application/pdf/nwpleaflet_0_es.pdf
- CMNUCC. (2008). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Obtenido de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: <http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/spa/06a01s.pdf>
- CMNUCC. (2014). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Obtenido de http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/objetivos/items/6199.php
- CMNUCC. (12 de 12 de 2015). *Convención Marco sobre el Cambio Climático*. Obtenido de Convención Marco sobre el Cambio Climático: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>
- Colmet-Daage, Cucalon, Delaune, Gautheyrou, & Gautheyrou. (1967). Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. II. Conditions de formation et d'évolution. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 5, 353–392.
- Contraloría General de la República. (2014). *Adaptación al cambio climático en Colombia*. Bogotá D.C.
- CORPOCALDAS & CI. (2005). *Estudio sobre el estado actual de los Páramos del departamento de Caldas*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS & CI. (2007). *Plan de Manejo de Páramos del Departamento de Caldas*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS. (1999). *lan de Ordenamiento Ambiental del Territorio de la Cuenca del río Chinchiná, síntesis del diagnostico -tomo I*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS. (2011). *Corporación autónoma Regional de Caldas*. Obtenido de Informe de Gestión 2011, primer semestre: http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/401/Arc2011/01-INFORME_GESTION_2011_I_SEM_DEFINITIVO.pdf

- CORPOCALDAS. (11 de 28 de 2011). *Corporación Autónoma Regional de Caldas*.
Obtenido de Corporación Autónoma Regional de Caldas:
http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=1018
- Cortés, D., & Sarmiento, C. (2013). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- CPC. (12 de 04 de 2012). *Climate Prediction Center*. Obtenido de Climate Prediction Center:
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>
- Crespo, Céleri, Buytaert, Ochoa, Cárdenas, Iñiguez, . . . Bièvre. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. In CODESAN, *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Ecuador: Editores.
- Crockford, R., & Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*, 14(16-17), 2903-2920.
- Cuatrecasas. (1934). Observaciones geobotánicas en Colombia. *Trab. Mus. Nac .Cienc. Nat. Sér. Bot, Madrid*, 27.
- Cuatrecasas. (1958). Aspectos de la Vegetación Natural de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. & Nat.*, 10(40), 221-264.
- Cuatrecasas. (1968). Paramo vegetation and its life forms . *Geo-ecología de las Regiones Montañosas de las Américas Tropicales*, 163-186.
- Cuero, R. (2010). Metodología de evaluación de impactos del cambio climático en los ciclos de agua y carbono en los ecosistemas de alta montaña en el Parque Nacional Natural Los Nevados (PNN) y Chingaza. *Universidad del Valle*.
- Cuesta, F., Muriel, S., Beck, R., Meneses, S., Halloy, S., Salgado, E., . . . Becerra. (2012). *Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales - Conformación de una*

red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación. Lima-Quito: Red Gloria-Andes.

Cuesta, Sevink, Llambí, Bièvre, D., & J, P. (2014). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos.* CODESAN .

DCC. (2015). *Normativa y políticas internacionales sobre cambio climático.* Obtenido de <http://cambioclimaticocr.com/2012-05-22-19-42-06/quienes-somos>

Diaz, H., Bradley, & Ning. (2014). Climatic changes in mountain regions of the American Cordillera and the tropics: historical changes and future outlook. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 735-743.

Diaz, H., Grosjean, M., & Graumlich, L. (2003). Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present and Future. *Climatic Change*, 59(1), 1–4.

Díaz, N., & Suárez. (2006). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 64-70.

DNP. (2011). *Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia.* Bogotá D.C: Departamento de Planeación Nacional.

DNP. (2011). *Lineamientos de política de Cambio Climático Resumen Ejecutivo.* Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación y Ministerio del Ambiente.

DNP. (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 Prosperidad para todos. Más empleo, menos pobreza y más seguridad.* Bogotá D.C: Departamento de Planeación Distrital.

DNP. (2012). *ABC Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Adaptación bases conceptuales marco conceptual y lineamientos.* Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación.

DNP. (2013). *Hoja de Ruta para la Elaboración de los Planes de Adaptación dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.* Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación.

DNP. (2015). *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 Todos por un País.* Bogotá D.C: DNP.

Duarte, C. M. (2006). *Cambi Global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema .* Madrid: Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.

- Easterling, D., & Peterson, R. (1995). The effect of artificial discontinuities on recent trends in minimum and maximum temperatures. *Atmospheric Research*, 37, :19-26.
- FAO. (2002). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/iym/en/aboutiym/aim2002e.pdf>
- FAO. (23 de 04 de 2015). *FAO Water*. Obtenido de FAO Water: <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>
- Ferrando, F. (2003). Alcances entorno a la gestión ambiental a nivel de cuencas hidrográficas. *Departamento de Geografía*, 175-184.
- Flórez. (1989). Inestabilidad en las altas montañas colombianas. *Cuadernos de Geografía Universidad Nacional de Colombia*, 1, 31-36.
- Flórez, A. (1992). Los nevados de Colombia: Glaciales y glaciaciones. *Anál. Geogr*, 15–55.
- Flórez, A. (2002). Movilidad altitudinal de páramos y glaciares. *Memorias del Congreso Mundial de Páramos*, 80-90.
- Flórez, A. (2003). Geomorfología del Área Manizales-Chinchina, Cordillera Central. *Universidad Nacional de Colombia*, 238.
- FNA, & FESCOL. (2013). *Desarrollo económico y adaptación al cambio climático*. Bogotá: Fondo Nacional del Ambiente y Friedrich Ebert Stiftung en Colombia.
- Fonseca, H. (2005). *Efectos de la Deforestación sobre la dinámica hídrica de una selva nublada en la cuenca del río Cusiana (Colombia)*. Merida: Universidad de los Andes.
- Fonseca, H., & Ataroff, M. (2007). Efectos de la deforestación de una selva nublada sobre la dinámica hídrica en la cordillera oriental de Colombia. *Memorias de la primera conferencia internacional de cambio climático: Impactos en los Sistemas de Alta Montaña*, 225-263.
- Francou, B., & Pouyand, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales*. Bolivia: IRD.

- Francou, Ramirez, Cáceres, & Mendoza. (2000). Glaciar evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia and Antisana, Ecuador. *Ambio*, 29, 416–422.
- García, M., Raes, D., Allen, R., & Herbas, C. (2004). Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, 125, 67–82.
- Gonzalez. (2000). Monitoring cloud interception in a tropical montane cloud forest in the south western Colombian Andes. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 1, 97–117.
- Gutiérrez, M. H., & Zapata, P. A. (2007). *Hacia el entendimiento de las señales de Cambio climático o variabilidad climática en la Oferta hídrica superficial de cuencas Hidrográficas en zonas de alta montaña Estudio De Caso: Río Claro, Parque Nacional Natural Los Nevados*. Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia .
- Harden, & Mathews. (2000). Rainfall response of degraded soil following reforestation in the Copper Basin, Tennessee, USA. *Environmental Management*, 26(2), 163–174.
- Harden, C. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 249–263.
- Herzog, S., Jørgensen, R., Martínez, C., Martius, E., Anderson, D., & Hole, T. (2010). *Efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales: el estado del conocimiento científico. Resumen para tomadores de decisiones y responsables de la formulación de políticas públicas*. Brasil: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global.
- Hirsch, R., Slack, J., & Smith, R. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resour. Res*, 18, 107-121.
- Hofstede, R. (2002). Los páramos Andinos, sus habitantes, sus problemas y sus perspectivas. *Proyecto páramo*, 37-78 .
- Honty, G. (2007). América Latina ante el Cambio Climático. *Desarrollo, Economía, Ecología y Equidad América Latina – una iniciativa de CLAES*.

- Hulme, M., Osborn, T., & Johns, T. (1998). Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys Res Lett*, 79–82.
- Huntington, T. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle. *J. Hydrol*, 83–95.
- Hurato, G., & Moreno, O. (2007). *Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y el análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en un evento*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM & Universidad Nacional. (1997). Geosistemas de la Alta Montaña. *Universidad Nacional de Colombia*.
- IDEAM. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2008). *Preparación de la segunda comunicación de Colombia ante la convención marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá D.C: IDEAM.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia. Escala: 1:100.000*. Bogotá : Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales .
- IDEAM. (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá D.C: IDEAM.
- IDEAM. (2010). *Sistemas morfogénicos del territorio colombiano*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2011). *Programa de Integración de Ecosistemas y Adaptación al Cambio Climático en el Macizo Colombiano*. Obtenido de Ministerio del Ambiente y

Desarrollo sostenible:
https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Programa_de_Integraci%C3%B3n_de_Ecosistemas_y.pdf

- IDEAM. (2011). Resultados del Proyecto INAP- Donación TF 056350.
- IDEAM. (2012). *Glaciares de Colombia más que Montañas con Hielo*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014). *Hoja metodológica del indicador Cambio de superficie glaciar (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*. Bogotá D.C: Instituto de hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2016). *Hoja metodológica del indicador Balance de masa (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2016). *Impacto del fenómeno "El Niño" 2015-2016 en los nevados y en la alta montaña en Colombia*. Obtenido de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales:
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/132669/Impacto+de+El+Ni%C3%B1o+en+la+alta+monta%C3%B1a+colombiana.pdf/dd41d158-0944-41d5-917e-44fdb524e8ea>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional*

de Cambio Climático. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.

IPCC. (1990). *Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I*. New York: Intergovernmental Panel of Climate Change.

IPCC. (1990). *Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group II*. Camberra : Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (1995). *Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I combined with Supporting Scientific Material*. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (1996). *Climate Change Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge .

IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom: Cambridge University Press.

IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. New York: Cambridge University Press.

IPCC. (2007). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* . New York : Cambridge University Press.

IPCC. (2007). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.

- IPCC. (2013). Glosario. En IPCC, *Cambio Climático 2013. Bases Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo de Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático* (págs. 185-204). Nueva York : Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Regional Aspects*. New York : Cambridge University .
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Regional Aspects*. New York: Cambridge University.
- IPCC. (20 de Marzo de 2016). *Intergovernmental Panel on Climate Change* . Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change : http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- Jaimes, E. (1998). Condiciones meteorológicas a nivel global y local cambio climático y "El Niño" 1997-1998. *Revista Peru Biol*, 1-8.
- Jiménez, F. (1994). *El Ciclo Hidrológico Y El Hombre: Hacia Un Uso Sostenible Del Agua*. Turrialba, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Jiménez, F. (2006). *Conceptos básicos en manejo de cuencas. Curso de manejo de cuencas I*. Turrialba: CATIE.
- Jones, D., & Hulme, M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Int J Climatol*, 361– 77.
- Karl, T., & K. R. (1998). Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. *Bull Am Meteorol Soc*, 31– 41.
- Krasovskaia, & Gottschalk, L. (2002). River flow regimes in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 47, 597-609.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2004). Change detection in hydrological records a review of the methodology / Revue méthodologique de la détection de changements dans les. *Hydrological Sciences Journal*, 49, 7 - 19.

- Lleras, G. (2000). Instrumentos Económicos en la Política del Agua en Colombia: Tasas por el uso del agua y tasas retributivas por vertimientos contaminantes . *Universidad Externado de Colombia*, 1-12.
- Luteyn, J. (1992). Páramos: why study them? . En H. Balslev, & Luteyn, *Páramo: an Andean ecosystem under human influence* (págs. 1–14.). London: Academic Press.
- MA, IDEAM, & PNUD. (2001). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá D.C: ServiGrafics.
- MADS. (2013). *Hoja de ruta para la elaboración de los planes de adaptación dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático* . Bogotá D.C: MADS, IDEAM, DNP, UNGRD.
- MADS. (2013). *Nodos Regionales de Cambio Climático Articulando Acciones e Intereses frente al Cambio Climático*. Bogotá D.C: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, WWF.
- MADS. (2016). *Lineamientos para Incluir Cambio Climático en los Planes de Desarrollo de los Departamentos y Municipios de Colombia* . Bogotá D.C: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible .
- MADS. (05 de 05 de 2016). *Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible* . Obtenido de Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible : <https://www.minambiente.gov.co/index.php/ambientes-y-desarrollos-sostenibles/cambio-climatico>
- MADS, & ASOCARS. (2015). *Propuesta de Lineamientos para la Incorporación del Cambio Climático en los Planes Estratégicos de Macrocuencas y Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogota D.C: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y Desarrollo Sostenible. Obtenido de Propuesta de Lineamientos para la Incorporación del Cambio Climático en los Planes Estratégicos de Macrocuencas y Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.

- Mann, K. (1945). Non parametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Marengo, A., Pabón, J., Díaz, A., Rosas, G., Ávalos, G., Montealegre, E., . . . Rojas, M. (2011). Cambio Climático: Evidencias y Futuros Escenarios en la Región Andina . En S. Herzog, R. Martinez, Jorgensen, & H. Tiessen, *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales* (págs. 149-167). París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global .
- McCarty, J. (2001). Ecological Consequences of Recent Climate Change. *Conservation Biology*, 320-331.
- Mekis, E., & Hogg, W. (1999). Rehabilitation and analysis of Canadian daily pre-cipitation time series. *Atmos. – Ocean*, 53–85.
- Ministerio del Ambiente. (2002). *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana*. Bogotá D.C: Ministerio del Ambiente.
- Montealegre, E. (2009). *Estudio de la Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Bogota D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- Morán, E. (2011). *Variabilidad espacio-temporal de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del Duero y su relación con los cambios ambientales*. Salamanca .
- MRI. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5, 424–430.
- Muriel, R. D. (2006). Gestión Ambiental. Idea Sostenible. *Idea Sostenible. Revista. N°13 Universidad de Antioquia* , 14-117.
- Naciones Unidas. (1972). *Declaración de Estocolmo sobre el medio ambiente humano* . Estocolmo : Naciones Unidas.
- NOAA. (29 de 01 de 2015). *Natinal Oceanic and Atmospheric Administration* . Obtenido de Natinal Oceanic and Atmospheric Administration : <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one>

- Ohmura, A. (2012). Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 499–508.
- Ojeda, & Arias. (2000). Informe Nacional Sobre la Gestión del Agua en Colombia. 14-117.
- Pabón, D. (2003). El Cambio Climático Global y sus Implicaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía XII*, 111-119.
- Pabón, J. D. (2012). Cambio Climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posible para el siglo XXI. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 261-277.
- Parques Nacionales Naturales. (2005). *Documento ejecutivo del plan de manejo del Parque Nacional Natural Los Nevados*. Medellín: Parques Nacionales Naturales. Obtenido de Parques Nacionales Naturales.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2011). *Plan de Manejo 2007-2011 Parque Nacional Natural Los Nevados*. Medellín: Parque Nacional Natural Los Nevados.
- Pérez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L., & Ochoa, A. (1998). Evidencias del Cambio Climático en Colombia: Tendencias y Cambios de Fase y Amplitud de los Ciclos Anual y Semianual. *Bull. Ins. fr. études andines*, 537-546.
- Pizarro, Araya, Jordan, Farías, Flores, & Bro. (2006). The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology*, 327(1), 249–257.
- PNUD. (Diciembre de 2011). *Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo: http://www.undpcc.org/docs/UNFCCC%20negotiations/UNDP%20Summaries/2011_12%20December%20Durban%20COP%2017/UNDP%20Analysis%20Durban%20Climate%20Conference%2012Dec2011_sp.pdf
- PNUMA. (16 de Marzo de 2015). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Medio Ambiente por el desarrollo*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Medio Ambiente por el desarrollo: <http://www.pnuma.org/AcercaPNUMA.php>

- Pombo. (1989). Identificación de prioridades para la gestión ambiental en ecosistemas de Páramos, Sabanas, Zonas áridas y Humedales de agua dulce. *Geoingeniería-MMA*. .
- Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *revista de ingeniería. Universidad de los Andes*, 74-80.
- Poulenard, Bartoli, & Burtin. (2002). Shrinkage and drainage in aggregates of volcanic soils: a new approach combining mercury porosimetry and vacuum drying kinetics. *European Journal of Soil Science*, 53, 563–574.
- Poulenard, Michel, Bartoli, Portal, & Podwojewski. (2004). Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *European Journal of Soil Science*, 55, 487–496.
- Pounds, J., Fogden, M., & Capbell, J. (1999). Biological response to change on a tropical mountain . *Nature*, 611-615.
- Poveda, G. (2004). La hidrometeorología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Ciencias de la Tierra*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., & Pineda, K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Advances in Geosciences*, 107–116.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Barco, O., & Correa, P. (2012). Influencia de fenómenos macro climáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 121-130.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología colombiana*, 6, 121–130.
- Poveda, Moreno, Vieira, Agudelo, Arias, Salazar, . . . Guzmán. (2012). Caracterización del ciclo diurno de las precipitaciones en los Andes tropicales de Colombia. *Universidad*

Nacional de Colombia & Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFÉ,
2-10.

Price, M. (2003). Las montañas: ecosistemas de importancia mundial. *Universidad de Oxford.*

Prieto, A. I. (2008). Cuantificación de la población ubicada en la cuenca alta de Río Claro (volcán nevado Santa Isabel), identificación de uso del suelo, análisis del recurso hídrico en términos de uso, abastecimiento, calidad y disponibilidad, y análisis de la vulnerabilidad. En MAVDT, & P. IDEAM, *Preparación de la segunda comunicación nacional de Colombia ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático – CMNUCC” (PNUD/COL/00045745).* Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.

Puertas, O., & Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo, 23,* 0122-3461.

Quintana, R. (1997). Is temperature rising in the high mountains of the Andes in central South America? Preprints, 5th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. *Amer. Met. Soc.,* 320–321.

Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista Virtual REDESMA, 2(3),* 1-13.

Ramírez, V., & Jaramillo, Á. (2009). Relación entre el índice oceánico del El Niño y la lluvia, en la región Andina de Colombia. *Cenicafé, 60(2),* 161-172.

Rangel. (2000). *Colombia Diversidad Biótica III. La región de la vida paramuna en Colombia.* Bogotá D.C: Unibiblos.

Rangel, Lowy, & Cleef. (1995). *Comunidades vegetales en regiones paramunas del alto altiplano cundiboyacense.* Obtenido de www.banrep.gov.co/blaavirtual/paramo:
www.banrep.gov.co/blaavirtual/paramo

- Roa-García, Brown, Schreier, & Lavkulich. (2011). The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, 46, 0043-1397.
- Rodríguez, P. (2011). Estimación del valor económico, social y ecológico aproximado de los bienes y Servicios ecosistémicos de los glaciares del Parque Nacional El Cocuy y Del Parque Nacional Los Nevados (Colombia), frente al proceso de derretimiento. En C. Andina, & IDEAM, *Proyecto De Adaptación Al Impacto Del Retroceso Acelerado De Glaciares En Los Andes Tropicales (PRAA)*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- Roger, G., Barry, & Seimon. (2000). Research for Mountain Area Development: Climatic Fluctuations in the Mountains of the Americas and Their Significance. *Ambio*, 29(7), 364-370.
- Rolando, C., & Jan, F. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355.
- Ruiz, D., Arroyave, D., Maya, G. M., & Zapata, P. (2011). Estrés climático en ecosistemas de alta montaña de la cordillera central: Posibles impactos en la oferta hídrica superficial . *Jornadas Técnicas de Discusión 2010 realizadas por el Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, coordinado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA: “Alteraciones climáticas e impactos sobre el recurso hídrico”*, 73-79.
- Ruiz, D., Moreno, H., Gutiérrez, M., & Zapata, M. (2012). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the total environment*, 122-132.
- Salamanca, S. (1987). Distribución altitudinal de la vegetación en los andes centrales de Colombia. En S. Salamanca, *Fundamentos para la definición de pisos bioclimáticos. Análisis Geográficos*. Bogotá D.C: IGAC. Subdirección de investigación y divulgación geográfica.
- Salcido S., G. P. (2010). Gobernanza del agua a nivel local: Estudio de caso en el municipio de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco. *Cotidiano*, 83-90.

- Sarmiento, Cadena, Sarmiento, Zapata, & León. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sauer, W. (1957). El mapa geológico del Ecuador.
- Secretaria de Planeación Municipio de Villamaría. (2012). *Plan de Desarrollo 2012-2015*. Obtenido de Plan de Desarrollo 2012-2015: http://villamaria-caldas.gov.co/apc-aa-files/32666339626330333663366235353031/acuerdo_plan_de_desarrollo_2012__2015_7_pdf_1.pdf
- Seimon, T., Seimon, P., Daszak, S., Halloy, L., Schloegel, C., Aguilar, P., . . . Simmons, J. (2007). Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology*, 288-299.
- Sémiond, Francou, laCruz, A. d., & Chango. (1998). El glaciar 15 del Antisana Ecuador. *Tech. rep. ORSTOM*,.
- Sneyers, R. (1992). Use and misuse of statistical methods for detection of climate change. Climate Change Detection Project, Report on the Informal Planning Meeting on Statistical Procedures for Climate Change Detection. WCDMP.
- Strahler, A., & Strahler, A. (1994). *Geografía Física*. Barcelona: OMEGA.
- Thompson, L., Mosley-Thompson, E., & Henderson, K. (2000). Icecore palaeoclimate records in tropical South America since the last glacial maximum. *Journal of Quaternary Science*, 377–394.
- Tobón. (2009). *Los Boques Andinos y el Agua Serie investigación y sistematización #4*. . Quito : Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN.
- UNESCO. (1981). Método de Cálculo del Balance Hídrico, Guía Internacional de Investigación y Métodos. *Instituto de Hidrología de España* .

- UNFCCC. (2004). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático los diez primeros años*. Obtenido de http://unfccc.int/resource/docs/publications/first_ten_years_sp.pdf
- USGS. (02 de 05 de 2015). *Science for a changing worl*. Obtenido de Science for a changing worl: <https://www.usgs.gov/science/mission-areas/water>
- Van der Hammen, T. (1985). The plio-pleistocene climatic record of the tropical Andes. *Geol. Soc. London*, 483–489.
- Van der Hammen, T. (1997). *Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad de Colombia : Diversidad biológica. Tomo I*. Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Van der Hammen, T., Pabón, J., Gutiérrez, H., & Alarcón, J. (2002). El cambio global y los ecosistemas de alta montaña de Colombia. En MA, IDEAM, & PNUD, *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos en Condición de HotSpot y Global Climatic Tensor* (págs. 163-209). Bogotá D.C: Ministerio del Ambiente.
- Varela, A. (2009). Generalidades sobre el Cambio Climático. *Diversidad y Cambio Climático* , 11-26.
- Viles, A., & Goudie, A. (2002). Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science*, 105–131.
- Viles, H., & Goudie, A. (2003). Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 105–131.
- Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1016–1029.
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2003). Assessing the hydrological significance of the world's mountains. *Mountain research and Development*, 23(1), 32-40.
- Vuille, M., & Bradley, R. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research*, 3885-3888.

- Waddington, & Roulet,. (2000). Carbon balance of a boreal patterned peatland. . *Global Change Biology*, 6, 87–97.
- Wang, Q., Fan, X., & Wang, M. (2014). Recent warming amplification over high elevation regions across the globe. *Climate Dynamics*, 43, 87–101.
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254-271.