UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático

Olga Lucía Ocampo López

Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Manizales, Colombia
2012

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático

Olga Lucía Ocampo López

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Química

Director:
Ph.D., Jorge Julián Vélez Upegui
Codirectora:
Especialista Adela Londoño Carvajal

Línea de Investigación:
Ingeniería Ambiental
Grupo de Investigación:
Hidráulica e Ingeniería Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Manizales, Colombia
2012

A mis hijos: Daniel y Valeria

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a las siguientes instituciones que colaboraron con la información o facilitaron las herramientas de software para la realización del trabajo:

Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC. Ing. Luis Miguel Alzate, Hidrometeorología

Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFE. Dr. Álvaro Jaramillo Robledo, Investigador científico III, Agroclimatología.

Corporación Autónoma Regional de Caldas, CORPOCALDAS. Ing. Mariela Londoño. Subdirectora de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

Laboratorio de Hidráulica y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Ing. Mauricio Aristizábal, profesor de Sistemas de Información Geográfica - SIG

Universidad de Caldas. Centro de Sistemas de Información Geográfica SIG. Geólogo Alejandro Arenas

Universidad Autónoma de Manizales, UAM. Dr. Carlos Barco, por su asesoría en el manejo estadístico de la información.

Resumen

El análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná es un estudio técnico de diagnóstico que aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico. Incluye la caracterización física y climática y el balance hidrológico. La investigación estima las alteraciones en las variables climatológicas, en el régimen hidrológico y en la oferta hídrica por variabilidad climática; evalúa los cambios en la temperatura, la precipitación y la escorrentía por los eventos cálidos- El Niño- y fríos-La Niña- del fenómeno ENSO- Oscilación del Sur. Empleando indicadores del régimen hidrológico, identifica y confirma aspectos críticos como la baja capacidad de retención y regulación hídrica, el stress hídrico por disponibilidad per-cápita de agua; la presión por el uso y la alteración muy alta de la calidad del agua; indicadores que se traducen en una alta vulnerabilidad hídrica de la cuenca. A partir del análisis estadístico de las series históricas se evidencian las señales de cambio climático, reflejadas en aumento de las temperaturas medias en 0,5°C, mínimas en 0,45°C y máximas en 0,25°C, en promedio, para el período 1981-2010, con respecto al registro histórico-1951-1980 y el incremento en la frecuencia de las precipitaciones extremas-percentil 95 y 99-. En relación a la oferta, el balance hídrico reporta reducciones, en algunas estaciones hidrológicas. Las cuencas de alta montaña andinas como el río Chinchiná son vulnerables a los cambios climáticos; la vulnerabilidad por desabastecimiento se ha incrementado de moderada a alta por la muy baja capacidad de regulación y retención hídrica y el uso moderado del recurso; sin embargo, dicha vulnerabilidad podría acentuarse con el cambio climático, por efecto de la posible reducción en la oferta y por una mayor demanda de agua por el crecimiento de la población y de las actividades económicas.

Palabras clave: Vulnerabilidad

Multidisciplinarias: Balance Hídrico, Cambio Climático, Impacto, Variabilidad Climática.

Chinchina River Basin Vulnerability analysis for stationary conditions and Climate Change

Abstract

Chinchina River Basin vulnerability analysis is a diagnostic technical study which provides basic and strategic information for integrated water resource management. It includes physical and climatic watershed characterization and hydrological balance. The research estimates changes in climatic variables, hydrological regime and water supply due to natural climate variability. Effects on temperature, rainfall and runoff produced by “El Niño” and “La Niña” are also evaluated. Using hydrological indicators, critical issues such as low retention and water regulation capacity, water stress by per capita water availability, pressure for water use, water pollution and high vulnerability have been confirmed. Statistics analysis of historical series has shown signs of climate change by increasing in average temperatures of 0,50°C; 0,45°C in minimum temperatures and 0,25° in maximum temperatures for the period 1981-2010 in relation to the historical record-1951-1980. In addition, increasing frequency of extreme rainfall events over the 95 and 99 percentile has been detected. Regarding water balance, hydrological simulation of rainfall-runoff phenomenon has projected reduction in water supply. The Andean mountain Chinchina River Basin is vulnerable to climate change; however, the potential water availability reduction and the increasing demand from a population growth and economic activities would accentuate the water resources vulnerability.

Keywords: Vulnerability, Climate Change, Water Balance, Impacts, climate variability.

Contenido

Pág.

Resumen IX

Lista de Figuras 14

Lista de Tablas 18

Introducción 21

1. Estado del Arte 22
1.1 Vulnerabilidad del Recurso hídrico 22
1.2 Variabilidad climática 23
1.3 Cambio Climático 28
1.3.1 Cambio climático y efectos en los recursos hídricos a escala global 28
1.3.2 Efectos en los recursos hídricos en América Latina 34
1.3.3 Efectos en los recursos hídricos en Colombia 35
1.4 Modelos hidrológicos y análisis de vulnerabilidad 40
1.4.1 Modelación Hidrológica 40
1.4.2 Modelación Hidrológica y cambio climático 42
1.4.3 SIG para la caracterización de cuencas hidrográficas 45

2. Metodología 47
2.1 Objetivos 47
2.2 Metodología 47
2.2.1 Caracterización de la cuenca – Metodología. 49
2.2.2 Balance hidrológico - Metodología 52
2.2.3 Señales de cambio climático - Metodología 61
2.2.4 Alteraciones por variabilidad climática – Metodología 62
2.2.5 Análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico - Metodología 62
2.2.6 Posibles indicadores futuros - Metodología 68

3. Caracterización física de la cuenca 70
3.1 Localización de la cuenca 70
3.2 Características físicas de la cuenca 71
3.2.1 Características del relieve 71
3.2.2 Sistema de drenaje 73
3.2.3 Características morfométricas 82
3.2.4 Geología 84
3.2.5 Textura de suelos 86

3.2.6 Usos y cobertura del suelo....88

4. Caracterización Climática....93
4.1 Brillo solar....93
4.2 Humedad relativa....97
4.3 Radiación solar....99
4.4 Temperatura....102
4.4.1 Temperatura media....103
4.4.2 Temperaturas máximas....106
4.4.3 Temperaturas mínimas....108
4.5 Precipitación....108
4.6 Clasificación Climática....117

5. Balance hidrológico....119
5.1 Modelos de balance a escala diaria....119
5.2 Modelación hidrológica a escala mensual....131
5.3 Evapotranspiración....142
5.4 Escorrentía superficial....146

6. Señales de cambio climático....151
6.1 Brillo solar....151
6.2 Humedad Relativa....155
6.3 Radiación solar....158
6.4 Temperaturas....160
6.4.1 Temperatura media....160
6.4.2 Temperaturas máximas....166
6.4.3 Temperaturas mínimas....168
6.5 Precipitación....168
6.5.1 Precipitación media....168
6.5.2 Eventos extremos....176
6.6 Escorrentía Superficial....182
6.7 Evapotranspiración....187

7. Alteraciones por variabilidad climática....188
7.1 Temperatura media....188
7.2 Precipitación....190
7.3 Escorrentía superficial....200

8. Análisis de Vulnerabilidad....206
8.1 Indicadores del régimen hidrológico actual promedio....206
8.1.1 Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)....206
8.1.2 Caudales ambientales....207
8.1.3 Índice de Aridez....207
8.1.4 Indicadores de calidad del agua....208
8.1.5 Índice de disponibilidad per cápita de agua....210
8.1.6 Índice de stress hídrico relativo y uso de agua....211
8.1.6.1 Oferta hídrica disponible....211

8.1.6.2 Demanda hídrica 213
8.1.7 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento 215
8.2 Alteraciones por efecto de variabilidad climática 215

9. Posibles indicadores futuros 218
9.1 Bajo condiciones estacionarias 218
9.1.1 Temperatura Media 218
9.1.2 Precipitación Media 221
9.1.3 Brillo Solar 222
9.1.4 Escorrentía superficial 224
9.1.5 Indicadores del régimen hidrológico 225
9.2 Escenarios de cambio climático 226
9.2.1 Temperatura media 227
9.2.2 Precipitación media 232
9.2.3 Escorrentía superficial 240
9.2.4 Indicadores del régimen hidrológico 242

10. Conclusiones 244

11. Líneas de Investigación futuras 247

Bibliografía 248

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1.1: Variación del índice Oceánico El Niño- ONI 25
Figura 1.2: Duración de los episodios cálidos ENSO- El Niño 26
Figura 1.3: Duración de los eventos fríos ENSO- La Niña 26
Figura 1.4: Escenarios de emisiones de GEI y proyección de calentamiento global 29
Figura 1.5: Emisiones globales de CO_2 30
Figura 1.6: Retroalimentación positiva del vapor de agua 30
Figura 1.7: Efecto de la reducción del hielo y la nieve 31
Figura 1.8: Variaciones en la precipitación por el cambio climático 32
Figura 1.9: Efectos e impactos del cambio climático en los recursos hídricos 33
Figura 1.10: Efectos del cambio climático en la transformación lluvia- escorrentía 34
Figura 1.11: Cambios en la temperatura media del aire y en la precipitación anual 37
Figura 1.12: Cambios en la temperatura media del aire, escenarios A2- B2 37
Figura 1.13: Cambios en la precipitación, escenarios A2 - B2 38
Figura 1.14: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2011-2040 39
Figura 1.15: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2071 a 2100 39
Figura 1.16: Tipos de modelos bajo situación climática estacionaria 41
Figura 1.17: Modelos hidrológicos para la evaluación de respuestas al cambio climático 43
Figura 2.1: Esquema metodológico 48
Figura 2.2: Ubicación de estaciones meteorológicas y pluviométricas 51
Figura 2.3: Esquema de tanques modelo Tetis 53
Figura 2.4: Descripción esquemática del balance hídrico modelo Témez 54
Figura 2.5: Procedimiento de cálculo del modelo Témez 55
Figura 2.6: Descripción esquemática del balance hídrico modelo de Thomas abcd 56
Figura 3.1: Localización de la cuenca del río Chinchiná 70
Figura 3.2: Modelo de Elevación Digital -MED- de la cuenca del río Chinchiná. 72
Figura 3.3: Perfil longitudinal del río Chinchiná 73
Figura 3.4: Mapa de pendientes de la cuenca del río Chinchiná 74
Figura 3.5: Clasificación de la cuenca según el perfil transversal del río. 75
Figura 3.6: Mapa de direcciones de flujo de la cuenca del río Chinchiná 76

Figura 3.7: Mapa de áreas acumuladas de la cuenca del rio Chinchiná 77
Figura 3.8: Mapa de longitudes de flujo de la cuenca del río chinchiná..... 78
Figura 3.9: Mapa de tiempos de concentración – Método de Clark 80
Figura 3.10: Mapa de tiempos de flujo –valores mínimos..... 81
Figura 3.11: Mapa de tiempos de flujo –valores máximos 82
Figura 3.12: Red de drenaje cuenca del río Chinchiná..... 83
Figura 3.13: Orden de corriente cuenca del río Chinchiná 84
Figura 3.14: Subcuencas del río Chinchiná..... 85
Figura 3.15: Descripción de las subcuencas del río Chinchiná. 86
Figura 3.16: Subcuencas del río Chinchiná para el estudio..... 87
Figura 3.17: Mapa geológico cuenca del río Chinchiná 88
Figura 3.18: Tipos de coberturas para la cuenca del río Chinchiná. 89
Figura 3.19: Mapa de textura de suelos cuenca del río Chinchiná 90
Figura 3.20: Mapa de uso de suelos clasificación general 91
Figura 3.21: Mapa de uso de suelos y coberturas cuenca del río Chinchiná 92
Figura 4.1: Brillo solar- horas de sol al día - en las estaciones climáticas- 1981-2010 94
Figura 4.2: Distribución del brillo solar mensual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010..... 94
Figura 4.3: Brillo solar anual promedio subcuencas del río Chinchiná. 1981-2010..... 94
Figura 4.4: Mapa de brillo solar diario cuenca del río Chinchiná- 1981-2010. 95
Figura 4.5: Mapa de brillo solar anual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010..... 96
Figura 4.6: Humedad relativa promedio en las estaciones climáticas 1981-2010 97
Figura 4.7: Mapa de humedad relativa cuenca del río Chinchiná 1981-2010 98
Figura 4.8: Distribución humedad relativa estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 99
Figura 4.9: Comparación radiación solar estimada vs mediciones- 2002-2010 100
Figura 4.10: Mapa de radiación solar cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 101
Figura 4.11: Radiación solar promedio en las estaciones de la cuenca-1981-2010 102
Figura 4.12: Distribución de la radiación solar cuenca del río Chinchiná 102
Figura 4.13: Distribución de temperaturas medias estaciones de páramo 2003-2010..... 103
Figura 4.14: Temperatura media cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 104
Figura 4.15: Relación temperatura media con la altitud cuenca del río Chinchiná 104
Figura 4.16: Mapa de temperaturas medias cuenca del río Chinchiná 1981-2010 105
Figura 4.17: Temperaturas máximas estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 106
Figura 4.18: Mapa de temperaturas máximas promedio 1981-2010..... 107
Figura 4.19: Temperaturas mínimas cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 108
Figura 4.20: Mapa de temperaturas mínimas promedio 1981-2010..... 109
Figura 4.21: Distribución de la precipitación mensual promedio en la cuenca 1981-2010..... 111
Figura 4.22: Precipitación anual promedio en las estaciones de la cuenca 1981-2010 111
Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010 112
Figura 4.24: Mapa de precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010..... 116
Figura 4.25: Clasificación climática de Lang cuenca del rio Chinchiná 1981-2010 118

Figura 5.1: Hidrogramas de calibración del modelo TETIS estación El Retiro 121
Figura 5.2: Hidrogramas de validación temporal del modelo TETIS estación El Retiro 122
Figura 5.3: Validación espacial del modelo TETIS 123
Figura 5.4: Curva de duración de caudales -2002-2009 124
Figura 5.5: Curva de duración de caudales- factores de calibración Tabla 5.1 126
Figura 5.6: Calibración del modelo hidrológico – 2006-2007 128
Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual – El Retiro 1981-2009 135
Figura 5.8: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Chupaderos 1988-2009 .. 139
Figura 5.9: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Sancancio 1981-2009 140
Figura 5.10: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Montevideo 1981-2009 141
Figura 5.11: Mapa de Evapotranspiración real anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010 143
Figura 5.12: Comparación Evapotranspiración cuenca del río Chinchiná modelo Cenicafé 144
Figura 5.13: Comparación evapotranspiración Posgrados vs estimada en Sancancio 2002-2010 144
Figura 5.14: Balance hídrico Lluvia- Evapotranspiración 1981-2010 145
Figura 5.15: Evapotranspiración promedio anual 1981-2010 146
Figura 5.16: Variación de caudales medios con el área de la cuenca 148
Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca 148
Figura 5.18: Caudales promedio mensual 150
Figura 5.19: Escorrentía superficial promedio mensual 150
Figura 5.20: Escorrentía superficial promedio anual 150
Figura 6.1: Análisis interdecadal brillo solar diario promedio 152
Figura 6.2: Distribución de brillo solar diario promedio tridecadal 153
Figura 6.3: Comportamiento de la humedad relativa media estaciones El Cisne y Letras 155
Figura 6.4: Humedad relativa promedio interdecadal 156
Figura 6.5: Distribución de humedad relativa promedio tridecadal 157
Figura 6.6: Radiación solar promedio kW-h/m^2 estaciones cuenca alta 159
Figura 6.7: Promedio de la radiación solar estimada tridecadal 159
Figura 6.8: Comportamiento de las temperaturas en las estaciones de páramo 161
Figura 6.9: Comportamiento de las temperaturas estaciones cuenca alta 163
Figura 6.10: Temperatura media diaria promedio interdecadal 164
Figura 6.11: Distribución de temperatura media análisis tridecadal 165
Figura 6.12: Distribución de temperaturas máximas análisis tridecadal 167
Figura 6.13: Distribución de temperaturas mínimas promedio tridecadal 169
Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal 173
Figura 6.15: Anomalías en la precipitación anual 175
Figura 6.16: Precipitación máxima estaciones cuenca del río Chinchiná 176
Figura 6.17: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 95 177
Figura 6.18: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 99 177
Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV 178
Figura 6.20: Curvas de Precipitación-Área-Duración (24 horas)-Frecuencia 182

Figura 6.21: Caudales promedio interdecadales....183
Figura 6.22: Caudales promedio tridecadales....183
Figura 6.23: Distribución de caudales promedio tridecadales....184
Figura 6.24: Caudales promedio tridecadales – Agosto....184
Figura 6.25: Caudales promedio tridecadales- Noviembre....185
Figura 6.26: Comportamiento evapotranspiración potencial y real....187
Figura 7.1: Evolución de la anomalía estandarizada en la temperatura media y el ONI....189
Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI....190
Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña....195
Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña....196
Figura 7.5: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos El Niño....198
Figura 7.6: Comportamiento precipitación mensual máxima....199
Figura 7.7: Comportamiento de la precipitación mensual mínima 1981-2010....200
Figura 7.8: Escorrentía superficial mensual río Chinchiná 1981-2010....200
Figura 7.9: Comportamiento del caudal en las estaciones del río Chinchiná....201
Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI....202
Figura 7.11: Alteración del caudal medio por eventos fríos La Niña....204
Figura 7.12: Alteración del caudal medio por eventos cálidos El Niño....205
Figura 8.1: Variación mensual del Índice de Aridez 1981-2009....208
Figura 8.2: Índice de Calidad ICA....208
Figura 8.3: Concentración de contaminantes....209
Figura 8.4: Índice de Contaminación ICOMO....210
Figura 8.5: Evolución de la población cuenca del Río Chinchiná....211
Figura 8.6: Participación sectorial de la demanda potencial de agua en Colombia-2008....213
Figura 9.1: Tendencias en temperatura media promedio anual y curvas suavizadas....219
Figura 9.2: Tendencias en brillo solar promedio anual y curvas suavizadas....222
Figura 9.3: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]....228
Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020]....229
Figura 9.5: Temperatura media 2010-2039 [2020] vs normal climatológica....231
Figura 9.6: Precipitación media mensual HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]....233
Figura 9.7: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca alta....235
Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja....235
Figura 9.9: Caudal promedio mensual estación El Retiro Escenario A2....241
Figura 9.10: Posibles cambios climáticos 2011-2040 (IDEAM, 2010)....241
Figura 9.11: Sensibilidad y Vulnerabilidad al Cambio climático (IDEAM, 2010)....243

Lista de Tablas

Pág.
Tabla 1.1: Modelos hidrológicos empleados en estudios de impacto del cambio climático....44
Tabla 2.1: Estaciones meteorológicas y pluviométricas 50
Tabla 2.2: Expresiones para el cálculo de la radiación solar a partir del brillo solar 52
Tabla 2.3: Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación 60
Tabla 2.4: Calificación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) 63
Tabla 2.5: Calificación del Índice de aridez 63
Tabla 2.6: Umbrales del índice de stress hídrico 64
Tabla 2.7: Categorías para la evaluación del índice de uso de agua....65
Tabla 2.8: Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica 66
Tabla 2.9: Categorías del índice de disponibilidad per cápita de agua....67
Tabla 2.10: Categorías del índice de alteración de calidad del agua 67
Tabla 2.11: Matriz de relación para categorizar el índice de vulnerabilidad 68
Tabla 3.1: Cálculo del tiempo de concentración, tc....79
Tabla 3.2: Estaciones de caudal cuenca del río Chinchiná....81
Tabla 3.3: Características morfométricas cuenca del río Chinchiná 83
Tabla 3.4: Formaciones superficiales....89
Tabla 4.1: Modelo de regresión lineal humedad relativa- altitud 99
Tabla 4.2: Modelo de regresión lineal temperatura media- altitud 106
Tabla 4.3: Clasificación Climática- Caldas 117
Tabla 4.4: Clasificación de Lang 117
Tabla 5.1: Factores de calibración modelo TETIS estación El Retiro....120
Tabla 5.2: Resultados de calibración del modelo TETIS....121
Tabla 5.3: Resultados de validación temporal del modelo TETIS 122
Tabla 5.4: Resultados de la validación espacial del Modelo TETIS 125
Tabla 5.5: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en El Retiro 125
Tabla 5.6: Factores de calibración modelo TETIS estación Montevideo 127
Tabla 5.7: Funciones objetivo para la calibración estación Montevideo 2006-2007 127
Tabla 5.8: Validación de factores obtenidos en la calibración en la estación Montevideo 129
Tabla 5.9: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Montevideo 129
Tabla 5.10: Factores de calibración modelo TETIS en la estación Sancancio 130
Tabla 5.11: Funciones objetivo para la calibración en la estación Sancancio 130
Tabla 5.12: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Sancancio....131
Tabla 5.13: Resultados comparativos de calibración modelos hidrológicos escala mensual....133

Tabla 5.14: Resultados comparativos de validación modelos hidrológicos escala mensual 134
Tabla 5.15: Simulación modelos hidrológicos estación El Retiro 1981-2009.....137
Tabla 5.16: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 1988-1997.....138
Tabla 5.17: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 2003-2009.....138
Tabla 5.18: Simulación modelos hidrológicos estación Sancancio 1981-2009.....139
Tabla 5.19: Simulación modelos hidrológicos estación Montevideo 1996-2008 141
Tabla 5.20: Modelos para el cálculo de la Evapotranspiración.....142
Tabla 5.21: Caudales medios 1981-2009 147
Tabla 5.22: Rendimiento hídrico.....147
Tabla 6.1: Anomalías en el brillo solar anual promedio 1981-2010 154
Tabla 6.2: Anomalías promedio en el brillo solar anual 154
Tabla 6.3: Cambios en la humedad relativa.....158
Tabla 6.4: Anomalías en el humedad relativa promedio 158
Tabla 6.5: Cambios en la radiación solar estimada.....160
Tabla 6.6: Temperatura media anual por década.....164
Tabla 6.7: Temperatura media anual tridecadal.....166
Tabla 6.8: Anomalía en la temperatura media 1981-2010.....166
Tabla 6.9: Temperatura máxima promedio anual tridecadal 167
Tabla 6.10: Temperatura mínima promedio anual tridecadal.....168
Tabla 6.11: Distribución de probabilidad de lluvia diaria 170
Tabla 6.12: Significancia estadística análisis de varianza precipitación interdecadal.....171
Tabla 6.13: Significancia estadística análisis de varianza precipitación tridecadal.....172
Tabla 6.14: Significancia estadística análisis de varianza series de precipitación tridecadal 172
Tabla 6.15: Anomalías en la precipitación anual 176
Tabla 6.16: Análisis de verosimilitud o probabilidad conjunta 181
Tabla 6.17: Anomalías en los caudales observados.....185
Tabla 6.18: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala diaria 186
Tabla 6.19: Anomalías estimadas en los caudales promedio –escala diaria 186
Tabla 6.20: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala mensual 186
Tabla 7.1: Coeficientes de correlación Anomalía en la precipitación-índice ONI 194
Tabla 7.2: Anomalía estandarizadas en la precipitación promedio 1981-2010 ENSO.....199
Tabla 8.1: Índice de retención y regulación hídrica- IRH. 1981-2009 206
Tabla 8.2: Caudales ambientales 1981-2009 207
Tabla 8.3: Índice de Aridez 1981-2009 207
Tabla 8.4: Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua- IACAL.....210
Tabla 8.5: Población de la cuenca del río Chinchiná.....211
Tabla 8.6: Oferta hídrica total promedio 1981-2009.....212
Tabla 8.7: Oferta hídrica neta 212
Tabla 8.8: Demanda de agua municipios de la cuenca del río Chinchiná- Mm^3/año 213
Tabla 8.9: Demanda de agua agrícola.....214
Tabla 8.10: Demanda de agua sin considerar sector eléctrico 214
Tabla 8.11: Indicadores del régimen hidrológico medio 1981-2010 215
Tabla 8.12: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año seco 216
Tabla 8.13: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año húmedo 217

Tabla 9.1: Modelos de tendencias de la temperatura media anual promedio 220
Tabla 9.2: Proyecciones de aumento en la temperatura media anual. 220
Tabla 9.3: Modelos de tendencias de la precipitación media anual promedio 221
Tabla 9.4: Proyecciones de cambio en la precipitación anual promedio 222
Tabla 9.5: Modelos de tendencias del brillo solar anual promedio 224
Tabla 9.6: Proyecciones del brillo solar por análisis de tendencias 224
Tabla 9.7: Estimación de caudal para el período 2011-2040 condiciones estacionarias 225
Tabla 9.8: Indicadores del régimen hidrológico proyección de tendencias 225
Tabla 9.9: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario A2 232
Tabla 9.10: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario B2 232
Tabla 9.11: Anomalía en la precipitación modelo HADCHM3-A2 2010-2039 [2020] 238
Tabla 9.12: Anomalía en la precipitación modelo CSIRO-A2 2010-2039 [2020] 238
Tabla 9.13: Precipitación media observada y estimaciones escenario A2 239
Tabla 9.14: Anomalías en la precipitación anual promedio 240
Tabla 9.15: Caudal y anomalías promedio estimadas 2010-2039 240
Tabla 9.16: Indicadores del régimen hidrológico proyecciones futuras 242

Introducción

Colombia, aunque sólo contribuye con el 0,37% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero-GEI (2004), es vulnerable al cambio climático. Profundizar en el conocimiento de los impactos permitirá el diseño e implementación de medidas efectivas de adaptación. Las cuencas de alta montaña son especialmente vulnerables y por tanto, son requeridos estudios locales que estimen los impactos presentes y potenciales del cambio climático y la variabilidad climática.

El caso de estudio comprende la cuenca del río Chinchiná, localizada en la región centro sur del departamento de Caldas (Colombia), cuenca de alta montaña, que nace en el Parque Natural de Los Nevados a una altura de 5400 m.s.n.m.; ecosistema estratégico y biodiverso que concentra el 55% de la población del departamento de Caldas y la producción industrial y agropecuaria, principalmente cafetera, de los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná, Neira y Palestina, generando el 80% del PIB de Caldas.

La investigación incluye el análisis del comportamiento histórico, desde mediados del siglo pasado hasta el período actual, de las variables climatológicas: temperaturas-máximas, medias y mínimas-, brillo solar, humedad relativa, radiación solar y precipitación; calcula las anomalías y las tendencias en las variables climáticas; evalúa la influencia de dichas variables en el balance hidrológico y en la oferta hídrica; determina los indicadores del régimen hidrológico como los índices de retención y regulación hídrica, el de "stress" hídrico, el uso de agua y su posible variación en el tiempo. Incluye el análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico a la variabilidad climática, las alteraciones en la precipitación y la escorrentía por El Niño y La Niña y finalmente, estima los posibles efectos en el régimen hidrológico y en la oferta hídrica bajo condiciones de cambio climático.

El análisis de las variables climatológicas fue realizado a partir de los registros diarios de las estaciones meteorológicas (12) y pluviométricas (12) ubicadas en la cuenca, información suministrada por el IDEAM, La CHEC, CENICAFE y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Los Sistemas de Información Geográfica, SIG, fueron empleados para generar los mapas requeridos en el estudio hidrológico. Los modelos conceptuales y físicamente basados TETIS y Thomas fueron utilizados en el balance hidrológico, al igual que el modelo estadístico ARMA. El análisis gráfico fue realizado con las herramientas de Microsoft Excel; el análisis estadístico fue efectuado con el software SSPS y las distribuciones de probabilidad con AFINS 2.0.

1. Estado del Arte

1.1 Vulnerabilidad del Recurso hídrico

El cambio climático ha generado un nivel de atención sin precedentes en los últimos años; no sólo es prioridad de los países desarrollados, quienes están pactando medidas para mitigarlo, sino que es una creciente preocupación, en especial en los países en vías de desarrollo, por los posibles impactos negativos y la imperante necesidad de acciones de adaptación[1] (Comisión Económica para el América Latina y el Caribe [CEPAL], 2009).

Lamentablemente, la adaptación al cambio climático aún es espontánea y reactiva y se enfoca en la atención de desastres (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2006). Para responder al cambio climático se requiere un proceso gestión del riesgo, entendido como el producto de la probabilidad de un suceso por sus consecuencias. La capacidad de gestionar dichos riesgos sin sufrir pérdidas de bienestar, potencialmente irreversibles a largo plazo, es la vulnerabilidad, la cual revela el grado de desarrollo de una determinada región o la capacidad de afrontar los desastres ocasionados por las variaciones climáticas (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2008). La vulnerabilidad depende de la capacidad de adaptación y de la sensibilidad del sistema[2] (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC], 2007).

Hay evidencia que los recursos hídricos son vulnerables al cambio climático y que las consecuencias sobre la sociedad y los ecosistemas dependen de las medidas de adaptación (IPCC, 2008; IPCC, 2007). El estrés hídrico y los problemas de calidad del agua son los eventos adversos más probables a escala global (IPCC, 2007). Se estima además, una mayor demanda de agua para el riego en los climas cálidos, lo cual puede generar un incremento de la competencia por el uso entre los distintos sectores (Magrin et.al., 2007; Rosenzweig et.al, 2004).

[1] La adaptación es el grado en que es posible efectuar ajustes en las prácticas, procesos y estructuras de los sistemas, en función de los cambios provistos o reales del clima (IPCC, 2007).

[2] La sensibilidad es el nivel de reacción a un cambio en las condiciones climáticas (IPCC, 2007).

Es necesario, por tanto, analizar la vulnerabilidad de los recursos hidricos, para cualificar el grado de fragilidad de la fuente con respecto al abastecimiento y a la amenaza de sequía cuando se presentan períodos con condiciones climáticas extremas (Vincent, 2007; IPCC, 2007; Sharma, 2009). La vulnerabilidad se puede abordar evaluando la susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hidrológico actual y determinando la vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico (Salazar, 2008).

Por su ubicación geográfica y las características topográficas, los países de América Latina son vulnerables al cambio climático (PNUMA, 2006; Magrin et.al., 2007). En la región se evidencia un aumento de los eventos meteorológicos extremos, los cuales han causado inundaciones, sequías y deslizamientos (IPCC, 2007); sin embargo, algunos son atribuibles a los fenómenos del Niño y la Niña que a su vez, pueden estar influidos por el cambio climático (CEPAL, 2009).

Colombia es vulnerable al cambio climático y los posibles efectos han sido descritos en las comunicaciones Nacionales a la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Instituto de Meteorología, Hidrología y Asuntos Ambientales, [IDEAM], 2001; 2010), dichos informes presentan las evaluaciones de vulnerabilidad y los posibles efectos futuros basados en los escenarios de emisión; muestran variaciones en las precipitaciones y la temperatura y reducción de las reservas de agua de las zonas de páramo y humedales.

1.2 Variabilidad climática

En Colombia, el clima está determinado por la ubicación del país en la zona tropical y por factores geográficos y atmosféricos como la precipitación, la intensidad de radiación solar, la temperatura, los sistemas de vientos, la altitud, la continentalidad y la humedad atmosférica. Estos aspectos crean una amplio espectro de climas y microclimas que van desde los más calurosos hasta lo más fríos en los picos de las montañas de las Cordilleras de los Andes (IDEAM, 2010; IDEAM, 2005; Jaramillo, 2005).

Las variables climatológicas incluyen la temperatura, la humedad, la presión, el viento y la precipitación, entre otras. Las temperaturas medias mensuales y los regímenes de precipitación son las más importantes, porque las demás variables están relacionadas entre sí. En climatología se utilizan los valores promedios para definir y comparar el clima. La normal climática es una medida utilizada con este propósito y representa el valor promedio de una serie continua de observaciones de una variable climática, durante un periodo de por lo menos 30 años (IDEAM, 2005).

En diferentes años, los valores de las variables climatológicas fluctúan por encima o por debajo de la normal climatológica[3]. La secuencia de estas oscilaciones, alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como Anomalía (IDEAM, 2005).

El clima varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio; dentro de sus fluctuaciones temporales se tiene (IDEAM, 2005; Montealegre, 2005):

- **Intraestacional**: oscilaciones que determinan las condiciones de tiempo durante semanas. Se destaca una señal de tipo ondulatorio de 30-60 días.

- **Estacional**: corresponde a la fluctuación del clima a nivel mensual. La migración de la Zona de Confluencia Intertropical- ZCIT-, es considerada como una de las más importantes fluctuaciones climáticas de la escala estacional y su dinámica explica, en un alto grado, la variabilidad de la precipitación en Colombia.

- **Interanual**: A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación. Un ejemplo típico de la variabilidad climática interanual corresponde a los fenómenos El Niño - La Niña - Oscilación del Sur.

- **Interdecadal**: En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Sin embargo, estas fluctuaciones de largo plazo influyen notablemente en las actividades humanas y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables climáticas.

La variabilidad climática natural depende de las condiciones atmosféricas que presentan anomalías frente a la normal climatológica (IDEAM, 2005). Los fenómenos naturales que producen eventos extremos son frentes fríos, estacionarios, secos, huracanes, perturbaciones tropicales y células con una humedad desproporcionada, los cuales pueden provocar precipitación excesiva o sequías prolongadas. En Colombia (IDEAM, 2005), al igual que en muchas partes del mundo (CEPAL, 2009; IPCC, 2007; Trenberth & Thomas, 2003; Adger et. al, 2007), se considera que tales fenómenos están relacionados con la Oscilación del Sur-El Niño.

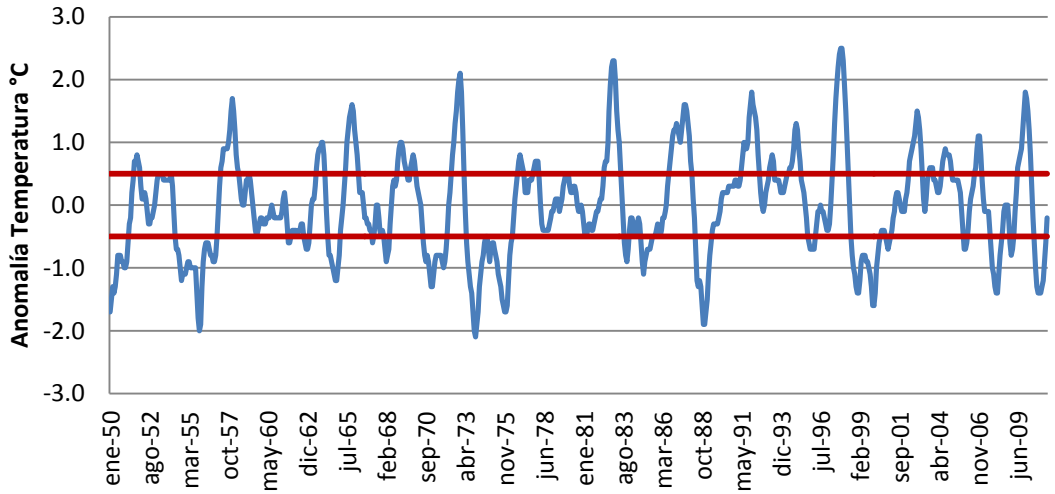
El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es el modo dominante de variabilidad climática en Latinoamérica y es el evento natural de mayor impacto socioeconómico (IPCC, 2008). Es un fenómeno global de interacción entre el océano y la atmósfera, que origina fluctuaciones de la temperatura superficial y de la presión del aire en el océano Pacífico, en cuyo transcurso se alternan episodios cálidos y fríos, más conocidos como El Niño y La Niña, respectivamente (PNUD,

[3] La normal climatológica es la información (promedios multianuales, amplitud, valores máximo y mínimo, varianza) de las variables climatológicas para el periodo de referencia; representa el clima presente; sobre este período se cuantifican los cambios al compararlo con las variables en otro periodo (IDEAM, 2010).

2000; The National Oceanic and Atmospheric Administration [NOOA], 2011). Este evento está asociado con un dramático cambio en el régimen de precipitaciones (Randall, 1998) y es el principal modo global de variabilidad del clima en un plazo de 2 a 7 años (Dore, 2004). La antítesis del Niño es la Niña (Phinlander, 1990).

Cada fenómeno ENSO tiene particularidades específicas (IDEAM, 2005). La Figura 1.1 presenta la variación del Índice Oceánico El Niño (ONI), medido como la media móvil de 3 meses consecutivos, de las anomalías de la temperatura superficial en la región central del Océano Pacífico (5°N-5°S , 120°-170°W), para el período de referencia 1971-2000. En los episodios fríos las anomalías son inferiores a -0,5°C y en los cálidos superiores a 0,5°C (NOOA, 2011).

Figura 1.1: Variación del índice Oceánico El Niño- ONI



Fuente datos: (NOOA, 2011)

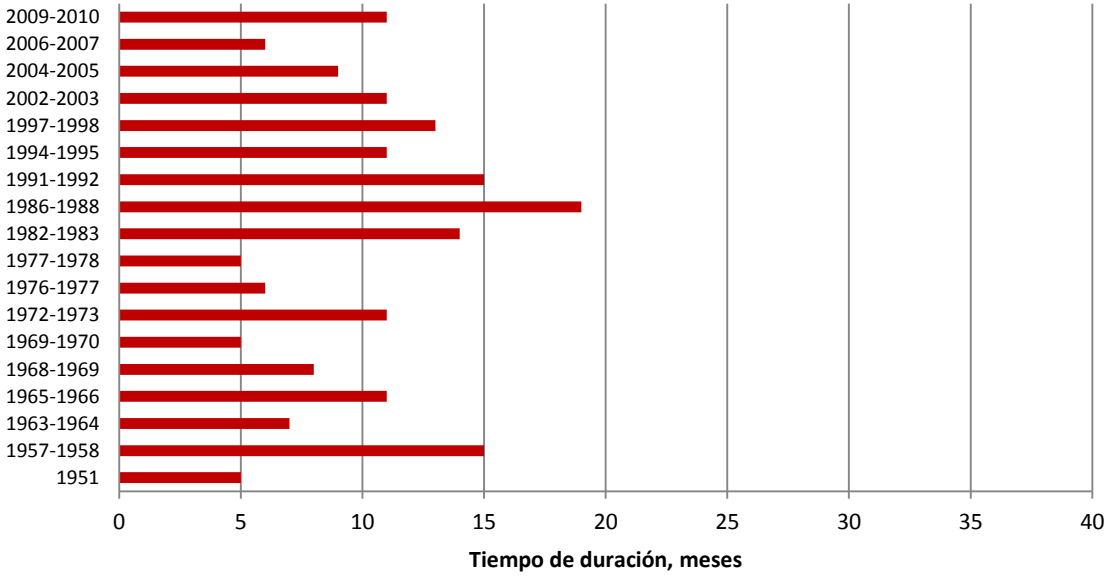
Los registros históricos (NOOA, 2011) contienen información sobre la duración e intensidad de los episodios cálidos, los cuales se compilan en la Figura 1.2. Los eventos más intensos, según el índice Oceánico Niño, se presentaron en los períodos:

- Mayo 1972 a Marzo 1973, ONI_{media} = 1,32.
- Mayo 1982 a Junio 1983, ONI_{media} = 1,39.
- Mayo 1997 a Mayo 1998, ONI_{media} = 1,74.
- Junio 2009 a junio 2010, ONI_{media} = 1,15.

Con respecto a los episodios fríos (Figura 1.3); los más marcados se registraron durante:

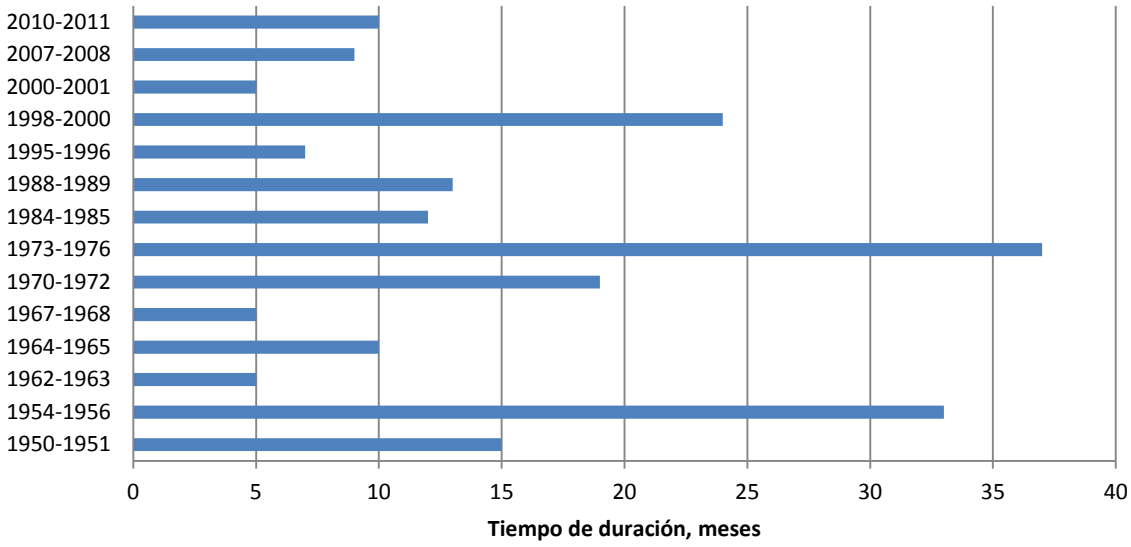
- Mayo 1973 a Mayo 1976, ONI_{media} = -1,11
- Mayo 1988 a Mayo1989, ONI_{media} = -1,29
- Julio 2010 a Abril 2011, ONI_{media} = -1,11

Figura 1.2: Duración de los episodios cálidos ENSO- El Niño



Fuente datos: (NOOA, 2011)

Figura 1.3: Duración de los eventos fríos ENSO- La Niña



Fuente datos: (NOOA, 2011)

En Colombia, los cambios en el régimen de lluvias tienen efectos muy diversos influenciados por el Niño y La Niña (IDEAM, 2010); es posible observar comportamientos diferenciados de los

desastres por fenómenos hidrometeorológicos: incremento durante La Niña y disminución en episodios del Niño (Velásquez & Rosales, 2002).

Los principales efectos del Niño en Colombia son (IDEAM, 2009; Velásquez & Rosales, 2002): el incremento de la temperatura atmosférica, durante las horas del día, en la regiones Pacífica, Andina y valles interandinos; disminución de la temperatura atmosférica en horas de la madrugada, especialmente en los altiplanos andinos; déficit de precipitación en las regiones Andina, Caribe y en la porción norte de la Pacífica; incremento de la radiación ultravioleta que alcanza la superficie de la tierra; disminución del caudal de los ríos en el centro, occidente y norte de Colombia (Poveda et.al., 2004; 2006; 2011); perturbación significativa de las precipitaciones, la humedad del suelo y la evapo-transpiración (Poveda & Mesa, 1997; Poveda et al. 2011).

El Niño genera impactos en la vegetación y el suelo por pérdida de humedad y de aglutinantes, lo cual facilita la propagación de incendios y los movimientos de masa cuando llega la temporada de lluvias (IDEAM, 2009; Velásquez & Rosales, 2002). Se han detectado efectos sobre la pesca marítima; en el transporte fluvial por la reducción entre 10% y 25% de los volúmenes de carga transportada por ríos; en el sector hidroeléctrico, por la disminución de los niveles de embalses y represas, con incrementos tarifarios; y en la salud por aumento de enfermedades tropicales como malaria, dengue y cólera (Banco de la República, 2007).

La región Andina es una de las más afectadas por el fenómeno del Niño. Los períodos con sequías más extendidas se han registrado en los años 64-65, 72-73, 76-77 y 91-92, con más de un semestre consecutivo; se presentaron además sequías en semestres aislados en más del 50% del territorio, en los años 67 B, 83 B, 85 A, 87 A y 97 B (IDEAM, 2005).

El Niño afecta considerablemente los recursos hídricos (Randall, 1998; Poveda et. al 2011). En Colombia, los caudales mínimos en épocas del Niño, se reducen en promedio en un 20% (Fondo para la Reconstrucción y desarrollo del Eje Cafetero, [FOREC] et. al., 2000); en la cuenca del río Cauca, provoca una disminución del flujo medio del 30% con pérdidas hasta del 80% en algunos tributarios (Carvajal et al., 1998), mientras que en la cuenca del río Magdalena se registran pérdidas en el caudal del 55% (IDEAM, 2004).

En el fenómeno opuesto, La Niña, los vientos alisios del sur se intensifican frente a las costas suramericanas y provocan una reducción de la temperatura del océano Pacífico (NOOA, 2011; IDEAM, 2009). Influye en el clima nacional y produce disminución en la temperatura ambiente; incremento de las lluvias en las regiones Caribe y Andina; reducción de la radiación solar y efectos en la frecuencia de los ciclones tropicales del Caribe. Los impactos incluyen aumento significativo de los niveles de los ríos y con ellos la probabilidad de inundaciones, crecientes súbitas en las zonas de alta pendiente, y una mayor probabilidad de deslizamientos de tierra (Velásquez & Rosales, 2002; IDEAM, 2009).

En Colombia, los períodos de exceso de lluvias se presentaron principalmente en los años 1971, 1973, 1975, 1988 y 1998; se extendieron en más del 50% del territorio colombiano. La Niña produce mayores precipitaciones, por lo que los caudales máximos se incrementan entre el 70 al 170%. (FOREC et. al., 2000; IDEAM, 2010). Durante el evento 2010-2011 se generaron graves inundaciones en el territorio Colombiano; la magnitud de la tragedia desbordó las facultades

ordinarias del Estado para atender la situación de desastre nacional, por el deterioro y destrucción de la infraestructura vial y urbana, derrumbes de diques y obras de contención, daños en vías, pérdidas de zonas agrícolas, de viviendas y daños en la infraestructura de los servicios públicos (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2010).

1.3 Cambio Climático

1.3.1 Cambio climático y efectos en los recursos hídricos a escala global

El cambio climático según la CMNUCC, se refiere a un cambio en el clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global; se da además de la variabilidad natural del clima observada a lo largo de períodos de tiempo comparables (Adger et. al., 2007).

Los informes del IPCC son los principales documentos de referencia para la elaboración de estudios y políticas alrededor del tema del cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente, 2007). El cuarto informe de evaluación (IPCC, 2007), revela las siguientes cifras sobre el calentamiento global y sus efectos: "De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74°C [entre 0,56°C y 0,92°C]".

Las estimaciones del incremento de temperatura están relacionadas con la concentración de Gases de Efecto Invernadero- GEI. Los expertos (IPCC, 2007; Stern, 2006) advierten sobre la necesidad de control y mitigación, de modo, que a finales de siglo, el aumento oscile entre 1,5°C a 2,5°C. Las proyecciones de emisión son muy utilizadas para conjeturar el cambio climático futuro y son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad al cambio climático y las evaluaciones de impacto (McCarthy et. al., 2001; IPCC, 2007).

Los escenarios de emisión desarrollados por el IPCC reflejan diferentes caminos en los que el mundo se podría desarrollar y las consecuencias que conllevarían. Un escenario de emisión, es un resultado plausible y consistente, construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima (IPCC, 2007). Están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas, incorporando una serie de factores demográficos, económicos y tecnológicos, junto con las emisiones de GEI resultantes. No contemplan otras políticas climáticas además de las existentes (IPCC, 2007):

- **Escenario A1:** presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan direcciones alternativas de cambio tecnológico: A1FI: intensiva en combustibles fósiles; A1T: energías de origen no fósil; A1B: equilibrio entre las distintas fuentes.

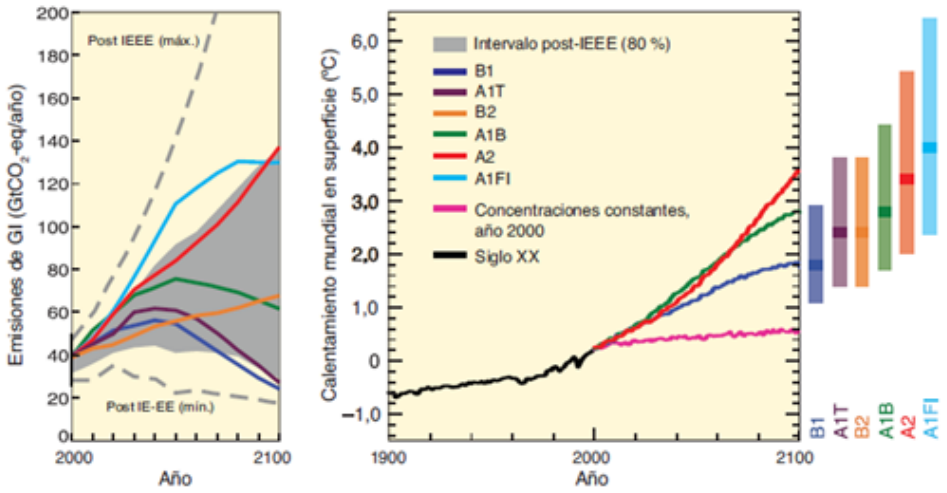
- **Escenario B1:** describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas, hacia una economía de servicios y de información.

- **Escenario B2:** supone un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico medio, más orientado a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.

- **Escenario A2:** describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, y desarrollo económico y cambio tecnológico lento.

Las proyecciones de los escenarios, desarrolladas por el IPCC (2007) se esquematizan en la Figura 1.4. En la cumbre de Copenhague, se compararon con los valores históricos registrados, llegando a las siguientes conclusiones (Allison et.al., 2009):

Figura 1.4: Escenarios de emisiones de GEI y proyección de calentamiento global

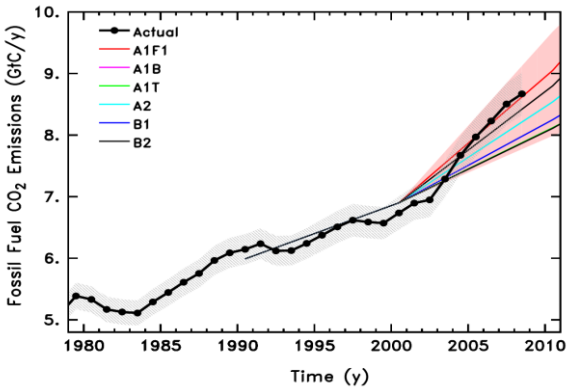


Fuente: (IPCC, 2007)

- Las emisiones globales de CO_2 de combustibles fósiles están cercanas a los escenarios más altos considerados por el IPCC (Figura 1.5).
- Se proyecta un calentamiento de la temperatura media global entre 2° a 7°C; con gran incertidumbre por las emisiones futuras.
- Hay una probabilidad muy alta que el calentamiento supere los 2°C, a menos que las emisiones globales comiencen a declinar rápidamente en el 2020.
- La tasa de calentamiento se acelerará si la retroalimentación positiva de carbono disminuye significativamente la eficiencia de la tierra y los océanos para absorber las emisiones de CO_2.
- Son muchos los indicadores que evidencian estar cercanos o por encima de los peores escenarios proyectados por el IPCC.

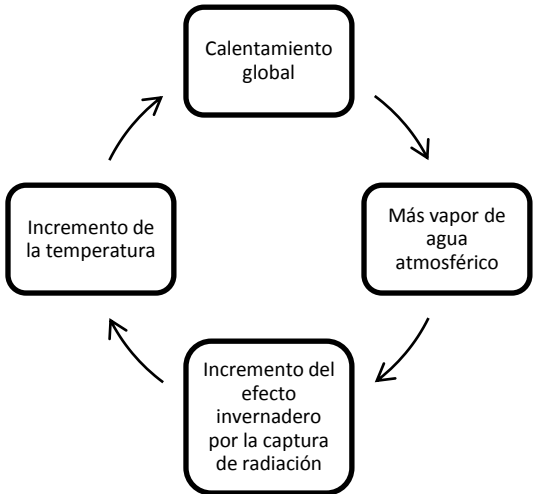
Entre las retroalimentaciones positivas al cambio climático figuran la del vapor de agua (Figura 1.6); en la medida en que el clima se calienta, se incrementa de forma exponencial la capacidad de retención del vapor de agua atmosférico; éste es un poderoso mecanismo de retroalimentación positiva que actúa amplificando el calentamiento producido por los niveles de CO_2 (Malham, 2000; Ruddiman, 2008). En efecto, los modelos y observaciones realizadas en la actualidad indican que a medida que el clima se calienta o enfría, la humedad relativa promedio global del vapor de agua calculada y observada permanece casi constante, en tanto, no sucede lo mismo con sus proporciones mezcladas (IPCC, 2007).

Figura 1.5: Emisiones globales de CO_2



Fuente: (Allison et.al., 2009)

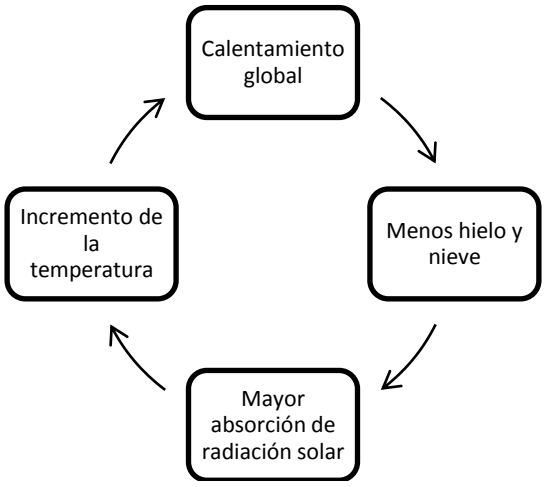
Figura 1.6: Retroalimentación positiva del vapor de agua



Un efecto adicional de retroalimentación positiva es la interrelación entre el hielo en la superficie terrestre y su capacidad de reflejar la radiación solar (albedo). Según la Figura 1.7, si la cubierta

de hielo o nieve se derrite, la superficie de la Tierra queda expuesta y por tanto, refleja menos la radiación solar incidente; por tanto, se produce más absorción de la radiación solar, y mayor calentamiento (IPCC, 2007).

Figura 1.7: Efecto de la reducción del hielo y la nieve



El ciclo hidrológico está estrechamente vinculado al balance de radiación; en respuesta a dicho balance, el sistema climático mantiene el equilibrio entre la energía entrante y saliente, mediante el ajuste de sus procesos: precipitación, temperatura, evaporación, etc. Por efecto del calentamiento, el forzamiento radiativo del clima es positivo y ha sido estimado en 1,6 W/m^2 (IPCC, 2007).

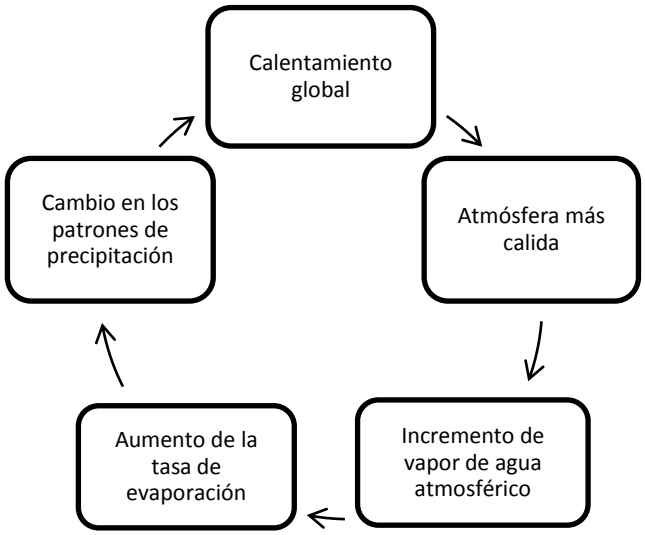
Las investigaciones recientes (IPCC, 2008) presentan correlaciones entre la temperatura y la precipitación, las cuales permiten evidenciar que los procesos que controlan el ciclo hidrológico y la temperatura están acoplados. Con respecto a la temperatura, la tendencia lineal de aumento, a escala global, es de 0,74°C- período comprendido entre 1906 - 2005- (IPCC, 2007), que equivale a 0,13°C por década.

Existe la probabilidad de cambio de la cantidad, la intensidad y la distribución temporal de las precipitaciones; según el IPCC (2007), la alteración de patrones de precipitación será provocada por los cambios en la circulación atmosférica y oceánica. Una atmósfera más cálida puede contener más humedad y las temperaturas más altas elevan la tasa de la evaporación, la cual a su vez afecta la precipitación (Figura 1.8). Se estima el incremento en la precipitación (Stott et. al., 2004), por la mayor evaporación de agua de los océanos (Lofgren, 2004); se predicen aumentos del 10 al 20% en latitudes por encima de 45° del Ecuador y decrementos entre el 5 al 20% en latitudes entre 5 a 40° (IPCC, 2007).

En promedio, los modelos climáticos actuales sugieren un aumento aproximado de 1 a 2 % por grado centígrado de calentamiento forzado por el CO_2 (Allen et. al., 2002). Sin embargo, dichos modelos muestran patrones complejos de cambio en la precipitación, con algunas regiones que podría recibir menos y otras más precipitación de lo actual (IPCC, 2007). La precipitación a su vez,

podría mostrar una tendencia hacia la menor frecuencia, pero mayor intensidad cuando ocurre, lo cual proyecta un aumento de la frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos (Stott et. al, 2004); en consecuencia, una mayor incidencia de inundaciones y sequías (Trenberth & Thomas, 2003). Por tanto, un ciclo hidrológico intensificado, producido por el calentamiento global, es un desafío para el manejo de las cuencas, por los posibles períodos de sequía y las temporadas de inundación.

Figura 1.8: Variaciones en la precipitación por el cambio climático



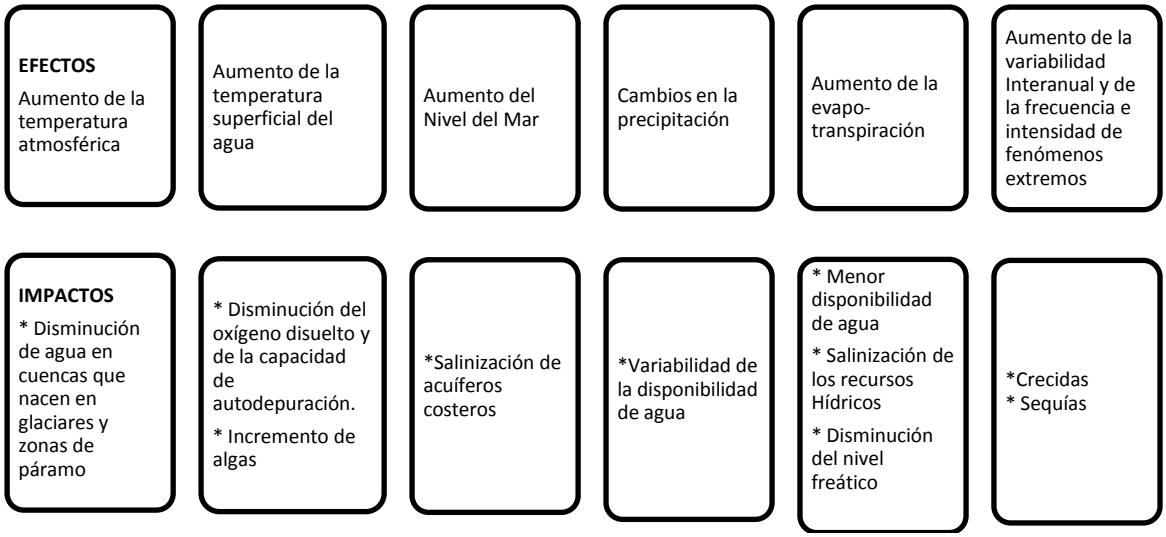
La alteración del ciclo hidrológico por el cambio climático, podría causar impactos sustanciales en la disponibilidad de los recursos hídricos (Figura 1.9); además de la probabilidad de cambio de la cantidad, la intensidad y la distribución temporal de las precipitaciones; podrían presentarse modificaciones en la escorrentía superficial y en la cantidad de agua evapotranspirada por las plantas (IPCC, 2007).

Los cambios en la temperatura y en la precipitación afectan los fenómenos de escorrentía superficial. El incremento de la precipitación no implica una mayor disponibilidad de agua superficial y subterránea. Arnell (2003) utilizó varios modelos climáticos para simular el clima del futuro y encontró un aumento en el promedio global de precipitación, pero disminuciones en la escorrentía superficial en grandes áreas. No está claro si los incrementos de la precipitación continental serán lo suficientemente grandes como para mantener los niveles actuales de escorrentía media anual (Gardner, 2009). La Figura 1.10 resume los principales factores involucrados en la transformación lluvia en escorrentía y su relación con el cambio climático.

Cualquier disminución de la escorrentía implica no solo la reducción de la oferta de agua superficial, sino también una menor humedad del suelo, por lo tanto, podría tener consecuencias adversas para la agricultura. Por tal razón, existe un gran interés en el desarrollo de métodos

para predecir el efecto del cambio climático en la descarga de los ríos (Tucker & Slingerland, 1997; Blumm & Tornqvist, 2000; Verhaar et. al, 2007).

Figura 1.9: Efectos e impactos del cambio climático en los recursos hídricos



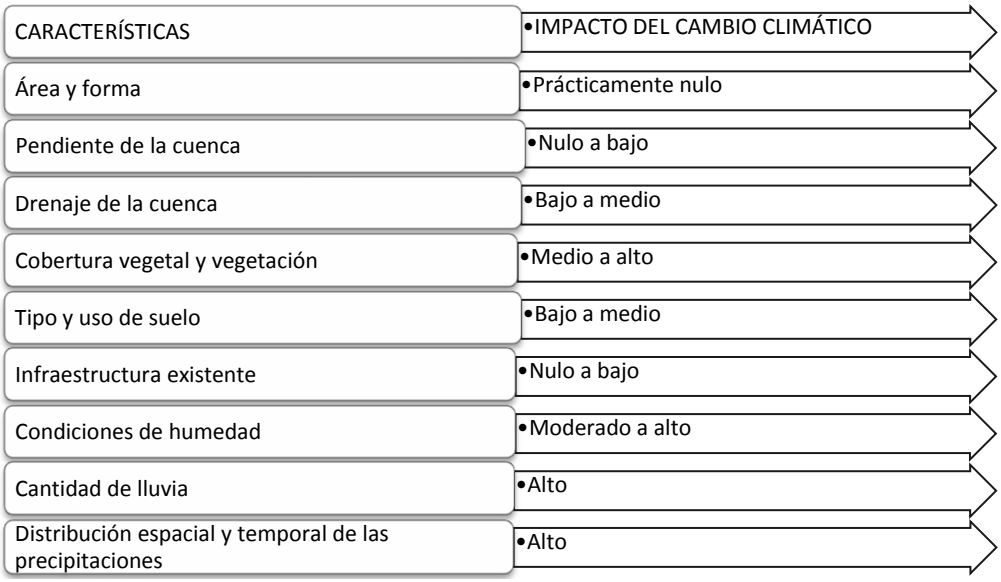
Adaptada: (IPCC, 2008)

El cambio climático afecta el ciclo del agua y pone en riesgo varios sectores económicos, extremadamente sensibles a los cambios en el clima (IPCC, 2007). Para responder al cambio climático, se requiere un proceso de gestión de riesgos que involucra un conjunto de acciones que permiten identificar y evaluar los riesgos, con el fin de emprender en forma efectiva las medidas necesarias para enfrentarlos. Abarca la identificación, la calificación y la evaluación de los riesgos, el diseño e implementación de medidas para la adaptación, el monitoreo y la evaluación (Ocampo, 2011).

Para la gestión del riesgo climático se han empleado herramientas tecnológicas (Balaghia et.a., 2010) que permiten el monitoreo y la evaluación: desarrollo de indicadores de vulnerabilidad, establecimiento de sistemas de alerta temprana, información satelital, modelación y simulación, sistemas de información geográfica (SIG), métodos geoestadísticos, recolección y transmisión automática de datos, entre otros.

El proceso adaptativo supone ajustes para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la capacidad de recuperación tras los cambios observados y esperados en el clima (Adger et. al., 2007). Algunas estrategias de adaptación como el uso de agua de lluvia, las técnicas de almacenamiento y conservación del agua, la reutilización, la desalinización, el uso eficiente y la irrigación han sido implementadas (IPCC, 2007; Kundzewicz et. al., 2007) . Sin embargo, es necesario tener presente que dichas medidas deben centrarse en mejorar el uso sostenible de los recursos naturales (International Institute for Sustainable Development, [IISD], 2003).

Figura 1.10: Efectos del cambio climático en la transformación lluvia- escorrentía



Adaptada (Ramírez, 2008)

1.3.2 Efectos en los recursos hídricos en América Latina

El clima en Latinoamérica es heterogéneo y está influencia por la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y del Atlántico Sur (SACZ) y el sistema monzón de Norte América. La variabilidad climática afecta la región, evidenciado por el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, en especial en los episodios del ENSO y la llegada del huracán Catarina al Brasil (2004), nunca antes visto en la zona (CEPAL, 2009).

Entre los impactos de los recursos hídricos relacionados con el clima, vinculados con el fenómeno ENSO, figuran: cambios en las precipitaciones, disminución en el sur de Chile, el sureste de Argentina y sur del Perú y aumento en el sur del Brasil, Paraguay, Uruguay, Noreste de la Argentina y Noreste del Perú y el Ecuador; aumento del nivel del mar (2-3 mm/año); retroceso de glaciales de Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia; aumento de la frecuencia de eventos extremos como crecidas, sequías o deslizamiento de tierra y stress hídrico en algunas zonas (Magrin et. al., 2007; IPCC, 2008; CEPAL, 2009).

Aunque las regiones son muy heterogéneas, los valores promedio de precipitación anual están alrededor de 1600 mm, y para la escorrentía 21 L/s/km^2 (IDEAM, 2010), lo cual es reflejado en la gran cantidad de recursos hídricos, que ascienden al 26% de los recursos del mundo (UN World Water Assessment Programme [WWAP], 2003). Sin embargo, las irregularidades en la distribución espacial y temporal afectan tanto la disponibilidad como la calidad en diferentes regiones, notoria por las altas estadísticas de población sin acceso al agua potable, equivalentes al 13,9% de la población-71,5 millones- (Magrin et. al., 2007). Por otra parte, la región presenta

zonas con elevado estrés hídrico- que impactan a una población de 22,2 millones-, como consecuencia de la concentración de la población en territorios donde el agua no es abundante, la expansión de la agricultura, el crecimiento demográfico, la urbanización, el desarrollo industrial y la reducción de la disponibilidad de agua subterránea, debido a la impermeabilización de las zonas de captación, provocada por la infraestructura urbana y la deforestación (CEPAL, 2009).

Hay evidencia de la alteración de los sistemas naturales por los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe. Las proyecciones indican que para el año 2020 serían leves, pero que se incrementarían en el 2050 y podrían ser mayores con un aumento de 1,5° a 2°C de la temperatura actual (IPCC, 2007). El cambio climático podría afectar de manera notable al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficie y del flujo base, produciendo diversos impactos sobre ecosistemas naturales y actividades humanas; los cambios en la precipitación y el retroceso o desaparición de los glaciares afectarían la disponibilidad de agua (IPCC, 2007).

La región es vulnerable al cambio climático y es posible que se acentúe dicha vulnerabilidad, en algunas regiones, por el efecto negativo de una mayor demanda de agua de consumo y riego, como consecuencia del incremento en la tasa demográfica y los impactos del cambio climático (IPCC, 2008).

Las pocas estrategias de adaptación de los países para hacer frente a los peligros y riesgos de inundaciones y sequías han sido relacionadas con el bajo producto Interno bruto, el aumento de la población en zonas vulnerables y las debilidades en el marco político, institucional y tecnológico (Solanes & Jouravlev, 2006). Sin embargo, la adaptación es necesaria para reducir los efectos negativos. Se requieren mejores sistemas de vigilancia y pronóstico del tiempo para facilitar la toma de decisiones; acciones para sostener ecosistemas altamente vulnerables; inversiones en infraestructura para el almacenamiento de agua, alcantarillado y control de inundaciones, entre otros (Banco Mundial, 2008).

1.3.3 Efectos en los recursos hídricos en Colombia

La ubicación geográfica en Colombia, circundada por el mar Caribe, el Océano Pacífico y la cuenca amazónica y la alta variabilidad en el relieve, hacen que el clima tenga un alto nivel de complejidad (Poveda, 2004). En promedio, la precipitación es de 3000 mm, la evapotranspiración asciende a 1180 mm y la escorrentía a 1830 mm (IDEAM, 2010). Estos factores han contribuido a la oferta hídrica del territorio; sin embargo, no está distribuida de manera uniforme en las diferentes regiones del país, por lo cual se presentan zonas con déficit de agua y otras con grandes excesos, que se traducen en inundaciones periódicas de duración considerable (IDEAM, 2001). Lamentablemente, la visualización del recurso hídrico como abundante e inagotable generó una gran despreocupación por el mismo. En las últimas décadas han surgido conflictos hídricos a escala local y regional, los cuales han puesto en crisis los mecanismos de asignación y han permitido comprender la realidad colombiana (IDEAM, 2008).

En materia de cambio climático, varios investigaciones evidencian sus señales: Temperaturas mínimas con tendencias de calentamiento del orden de 1°C en 20 años (Ochoa & Poveda, 2008); tendencias positivas en la temperatura y humedad relativa en Bogotá (Hense et. al, 1988); disminución en las precipitaciones en Bogotá y corrimiento en las fases de los ciclos anual y semianual de algunas variables climatológicas (Smith, et. al., 1996). Para el centro de Colombia, las temporadas de lluvias se han anticipado en los últimos años (Mesa, et. al., 1997); las principales cuencas hidrográficas, como el Cauca y el Magdalena exhiben decremento en los caudales (Poveda & Mesa, 1997; Ochoa & Poveda, 2008).

La primera comunicación Nacional ante la CMNUCC, concluye que Colombia es un país altamente vulnerable, pese a su bajo nivel de emisiones de CO_2. A partir de las proyecciones para el año 2050, un aumento en la temperatura media anual del aire entre 1°C y 2°C, produciría una variación en la precipitación de ± 15%, la desaparición del 78% de los nevados y del 56% de los páramos y de un ascenso estimado en el nivel del mar de 40 cm en la costa Caribe y de 60 cm en la costa Pacífica (IDEAM, 2001).

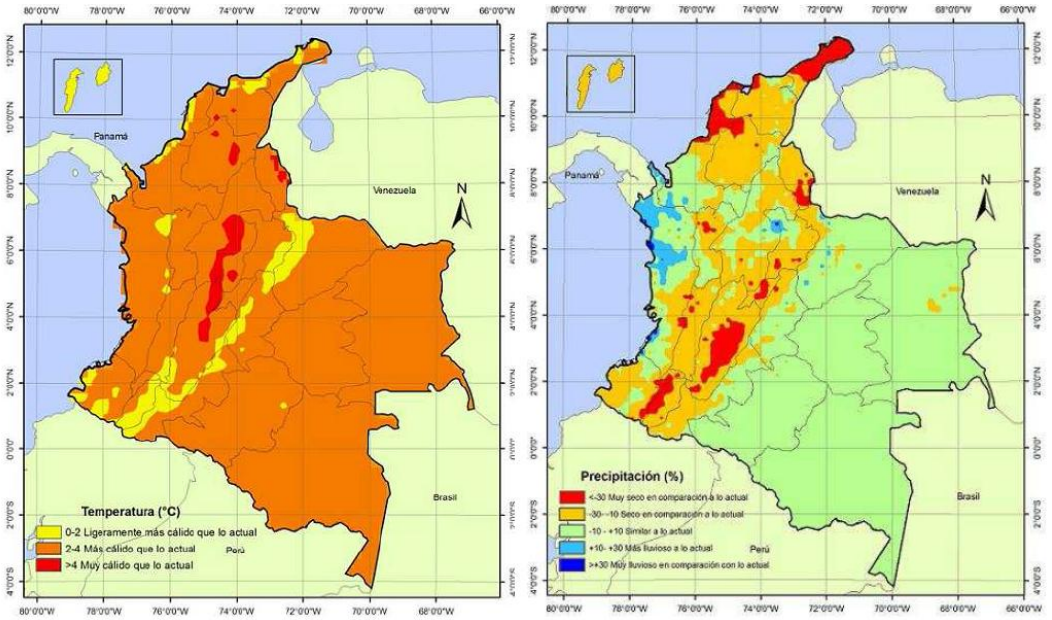
Los estudios de Pabón (2008), empleando el escenario A2, estiman que para finales del siglo XXI (2071-2100), la temperatura media del aire, podría incrementarse en 4°C- por encima del promedio 1961-1990-, en algunas regiones del país y que los volúmenes anuales de precipitación se podrían reducir hasta en un 30% en la región Andina y el Caribe (Figura 1.11).

Las proyecciones del IDEAM (2008) para el período 2071-2100, empleando el modelo climático PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) se presentan en las Figuras 1.12 y 1.13. En la zona Andina se estiman aumentos de temperatura entre 2 y 4°C y una reducción de las lluvias. Sin embargo, para el departamento de Caldas se observan zonas con incremento de precipitación hasta del 10%.

La Segunda Comunicación Nacional ante la CMNUCC presenta las siguientes evidencias del cambio climático en Colombia (IDEAM, 2010):

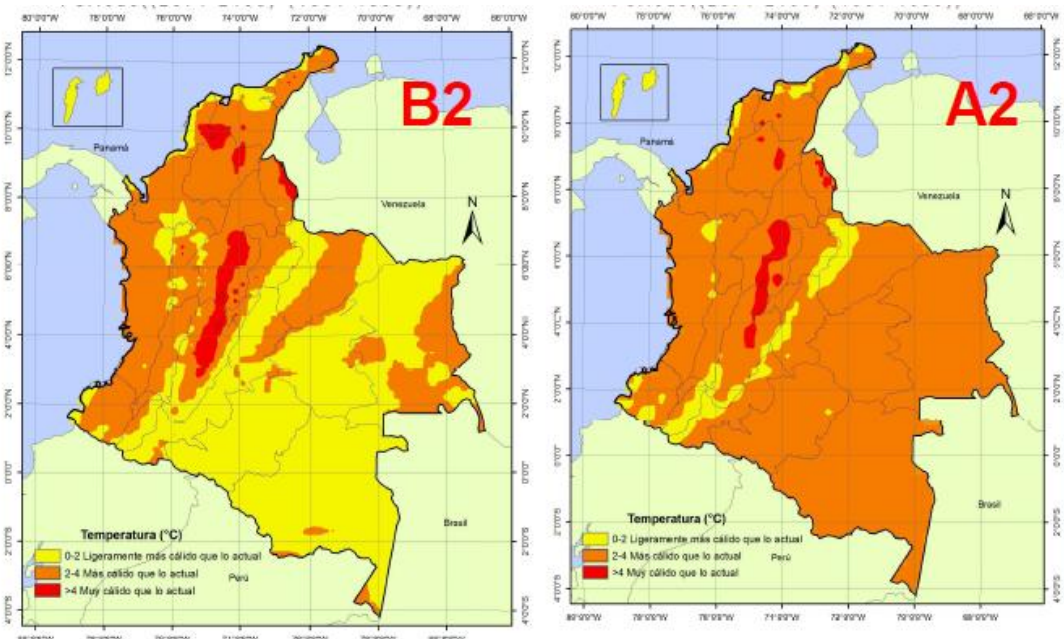
- Reducción en la precipitación en los páramos, amplios sectores de la región Andina, el sur del Pacífico y el piedemonte llanero.
- Aumento de las precipitaciones en la región Caribe y la Amazonía Colombiana.
- Incremento de las precipitaciones de alta intensidad en los pisos térmicos cálido, templado y frío y disminución en los páramos.
- Elevación de temperatura máxima, media y mínima en las estaciones de piso térmico frío y páramo.
- Tasa lineal de calentamiento promedio de 0,13°C por década
- Cambio de ±0,1%/año (±1%/década) en los registros de humedad relativa.
- Ascenso del nivel del mar en el Caribe de aproximadamente 3,5 mm/año y de 2,2 mm/año en el Pacífico, en Buenaventura..
- Pérdidas de 3 a 5% de cobertura glaciar por año y retroceso del frente glaciar de 20 a 25 m por año.

Figura 1.11: Cambios en la temperatura media del aire y en la precipitación anual



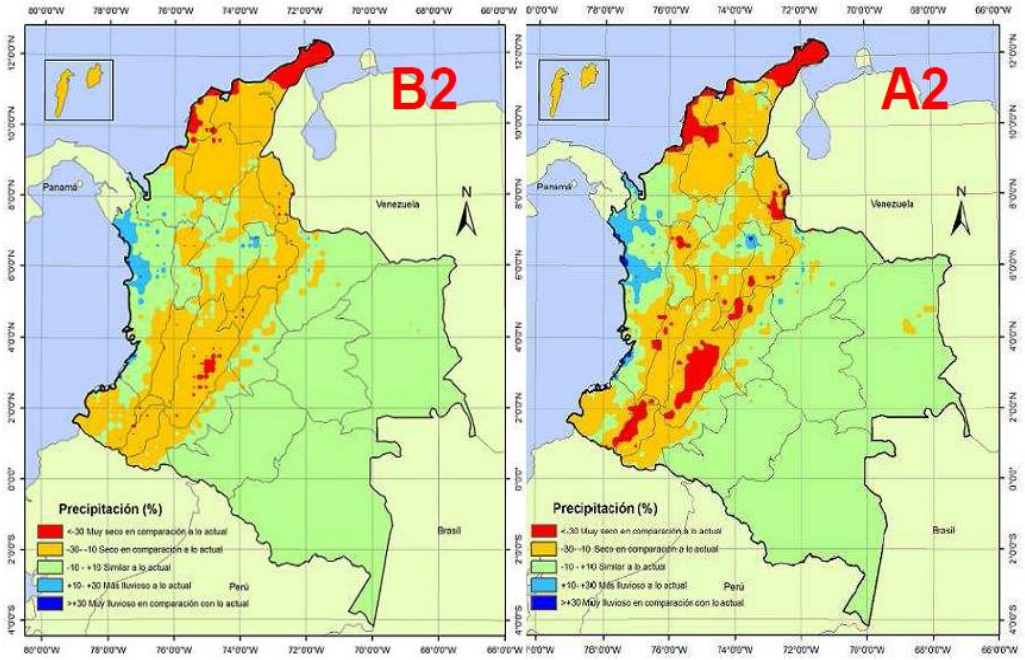
Fuente: (Pabón, 2008)

Figura 1.12: Cambios en la temperatura media del aire, escenarios A2- B2



Fuente: (IDEAM, 2008)

Figura 1.13: Cambios en la precipitación, escenarios A2 - B2



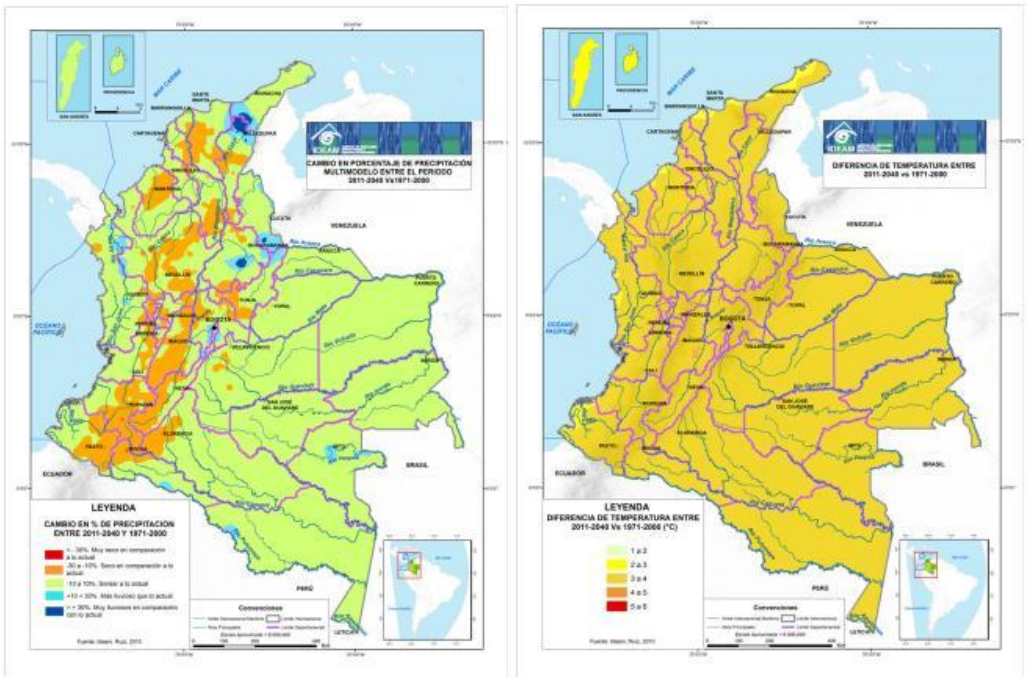
Fuente: (IDEAM, 2008)

El segundo informe a la CMNUCC (IDEAM, 2010), basado en los resultados de los Modelos ERA40 y GSM-MRI, estima:

- Un posible aumento de temperatura de 1,4°C para el periodo 2011-2040; 2,4°C para el período 2041-2070 y 3,2°C para el lapso comprendido entre los años 2071 a 2100, tomando como Normal Climatológica el período 1971-2000.
- Los resultados promedio de los escenarios para el lapso 2011 a 2040 (Figura 1.14), proyectan una posible reducción en la precipitación, mayor o igual al 10%, en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Córdoba, Huila, Nariño, Putumayo, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.
- Para el fin de siglo, 2071-2100, se tendrían posibles aumentos de la temperatura media en gran parte de la región Caribe y Andina, con valores que oscilan entre 3°C y 4°C.
- Las reducciones más significativas de lluvia, entre el 20 al 30%, para fin del siglo XXI, se presentarían en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda (Figura 1.15)

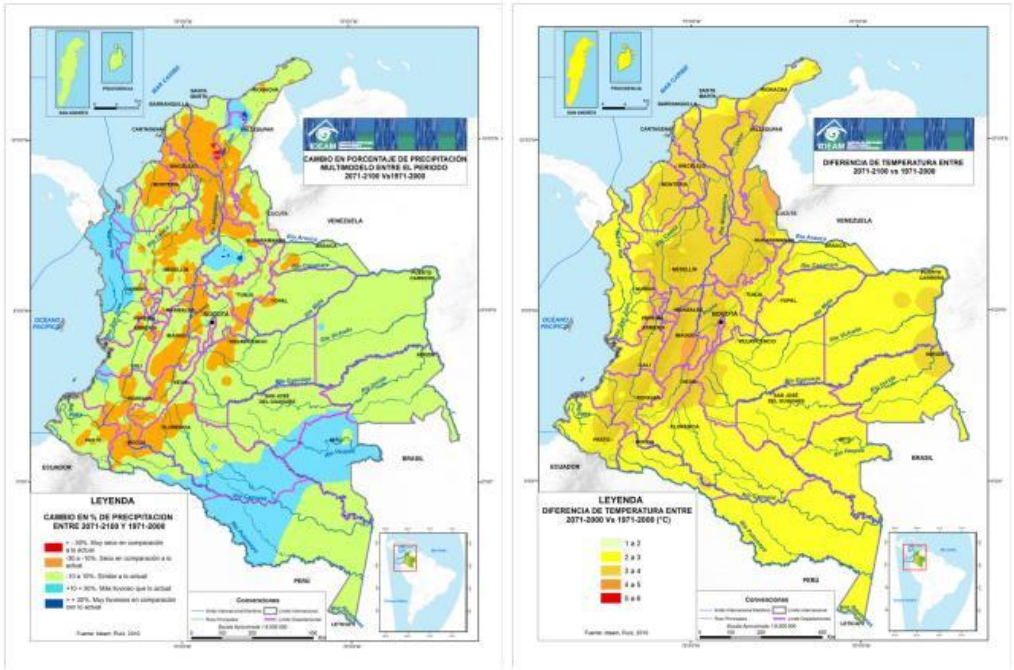
Los resultados de estas modelaciones están basados en las condiciones medias actuales y en el ciclo estacional (IDEAM, 2010); tienen incertidumbres generadas por algunas variables como la nubosidad, la humedad atmosférica y la evaporación (Mesa, 2007); no pueden tener en cuenta todas las posibilidades de adaptación ni todos los factores no climáticos dinamizantes de cambio; por tanto, deben ser tomados como indicadores de la necesidad de profundizar en la investigación y conocimiento de los impactos potenciales (Ocampo, 2011).

Figura 1.14: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2011-2040



Fuente: (IDEAM, 2010)

Figura 1.15: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2071 a 2100



Fuente: (IDEAM, 2010)

El análisis de vulnerabilidad de los cuerpos de aguas continentales realizado por el IDEAM (2010), concluye que los humedales son los ecosistemas más vulnerables al cambio climático y que para el período 2011 a 2040, el 63% de la superficie nacional tendría impactos potenciales altos y muy altos, donde los cuerpos de agua continentales de los departamentos de Bolívar, Magdalena, Cesar, Santander, Tolima y Amazonas serían los más afectados. Las cuencas de alta montaña son especialmente vulnerables al cambio climático y por tanto, son requeridos estudios locales que permitan estimar su vulnerabilidad.

La evaluación de la vulnerabilidad regional debe ser una herramienta que permita definir acciones efectivas de adaptación, de tal manera que se reduzcan los efectos e impactos del cambio climático y de la variabilidad climática.

En materia de adaptación, las líneas estratégicas planteadas por el IDEAM (2010) incluyen el fortalecimiento de la gestión del riesgo, de la investigación y la transferencia del conocimiento; el mejoramiento del uso del territorio como estrategia para disminuir la vulnerabilidad; la reducción de los impactos ambientales, económicos y sociales; el diseño e implementación de un arreglo institucional adecuado para la adaptación; la valoración y protección de la base productiva a partir de los bienes y servicios de la biodiversidad; el mejoramiento de la capacidad de adaptación de las comunidades vulnerables; el fortalecimiento de la gestión de la cooperación y de los recursos para la adaptación.

1.4 Modelos hidrológicos y análisis de vulnerabilidad

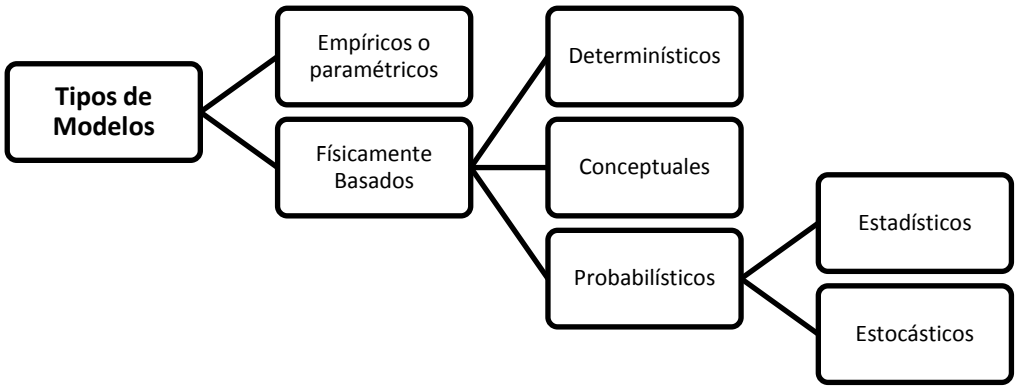
1.4.1 Modelación Hidrológica

La vulnerabilidad del recurso hídrico al cambio climático se puede abordar desde dos puntos de vista: mediante el análisis de susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hidrológico actual ante las posibles alteraciones climáticas y por el análisis de vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico (Salazar, 2008; IDEAM, 2010)

La estimación de las demandas se basa en métodos como los análisis de tendencias, de regresión, de series de tiempo y conocimiento de expertos (Barthel et al., 2008). Sin embargo, estos métodos deberían considerar la posibilidad de retroalimentación que existe entre oferta y demanda y las diversas opciones de adaptación influenciadas por el cambio climático (Sharma, 2009, Barthel et. al. 2008, Guan 2008).

La predicción de flujos de agua en una cuenca requiere el uso de modelos, los cuales deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal). Existen diferentes modelos que pueden emplearse como hidráulicos, hidrológicos, de planificación y de prevención (Xu & Singh, 2004; Debels & Escurra, 2010; Ponce, 1989; Sharma, 2009). La Figura 1.16 esquematiza los modelos para la simulación de los recursos hídricos bajo condiciones climáticas estacionarias.

Figura 1.16: Tipos de modelos bajo situación climática estacionaria



Adaptada: (Ponce, 1989; Debels & Escurra, 2010; Xu, 1999; Sharma, 2009)

Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial, caracterizando la precipitación sobre la superficie de la tierra y la fracción de agua que es evapotranspirada, el escurrimiento hacia cuencas hídricas y la recarga a los acuíferos subterráneos. La humedad del suelo y la escorrentía son procesos claves para una simulación precisa de la descarga, con modelos hidrológicos. Los datos históricos se utilizan para elaborar regresiones multivariadas entre la escorrentía y los parámetros climáticos (Vogell et al., 1999; Revelle and Waggoner, 1983).

Los modelos físicamente basados siguen las leyes de la física y/o procesos químicos y están descritos por ecuaciones diferenciales, se emplean cuando pueden medirse los parámetros a pequeña escala (Bormann, 2007). Los modelos conceptuales son representaciones simplificadas de los procesos físicos, en términos matemáticos, simulan procesos complejos basándose en parámetros claves conceptuales (Ponce, 1989). El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias (Nash & Sutcliffe, 1970).

Elegir el modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas hidrográficas (Clark et al., 2008). Para un estudio de caso en particular depende de muchos factores (Gleick, 1986); el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores dominantes de la selección (Xu, 1999). Por ejemplo, para evaluar la gestión de recursos hídricos a escala regional, modelos de precipitación-escorrentía (modelos de balance) han sido empleados (Gleick, 1986; Schaake & Liu, 1989; Mimikou et al., 1991; Arnell, 1992; Xu 1999). Para la evaluación detallada de flujo superficial, modelos conceptuales de parámetro globalizado han sido utilizados (Xu, 1999). Para la simulación de los patrones espaciales de respuesta hidrológica dentro de una cuenca, los modelos distribuidos son necesarios (Beven, 1989; Bathurst & O'Connell, 1992).

La modelación del proceso precipitación-escorrentía se fundamenta en la obtención de caudales a la salida de una cuenca, en un rango de tiempo determinado. Se calcula la precipitación neta

como la diferencia entre la precipitación y las pérdidas por infiltración o evaporación; se genera un hietograma de precipitación efectiva que debe ser transformado en un hidrograma unitario -respuesta de la cuenca ante los excesos de precipitación-(Chow et.al., 1988; Ponce, 1989). Para la transformación pueden seguirse diferentes metodologías: concentrada, fundamentada en la convolución del hidrograma unitario con un hietograma efectivo de tormenta, o distribuida, basada en el flujo terrestre que utiliza técnicas de ondas de difusión o cinemáticas (Bendient & Huber, 1988). La variabilidad espacial en estos modelos se tiene en cuenta al dividir la cuenca en subcuencas. Los hidrogramas obtenidos en cada subcuenca se agregan y se transportan hidráulicamente, aguas abajo hasta la confluencia de salida, empleando diferentes métodos como: Muskingum (Cunge, 1969), Muskingum-Cunge (Ponce & Yevjevich, 1978), Puls Modificado (Strelkoff; 1980) y Onda cinemática (Ponce & Simmons, 1978; Henderson & Wooding, 1964).

1.4.2 Modelación Hidrológica y cambio climático

La modelización hidrológica es una herramienta valiosa para el estudio de los procesos que rigen los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Dourojeanni et. al, 2002; GIRS Center, 2011). En escenarios de cambio climático, muchas cuencas son propensas a experimentar modificaciones no sólo en su hidrología media, sino también en la frecuencia y magnitud de los fenómenos hidrológicos extremos (IPCC, 2008; PNUMA, 2006; Allen et. al, 2002).

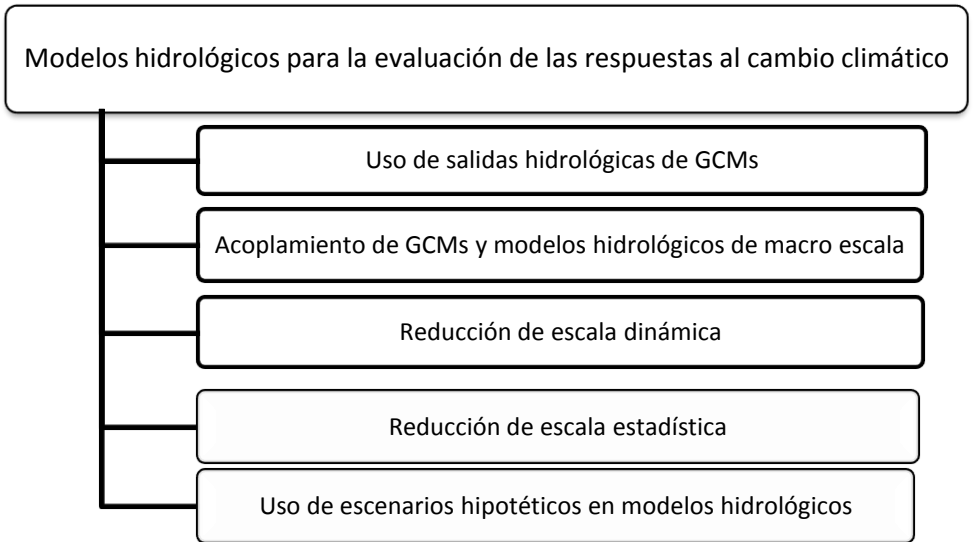
Actualmente, no hay alternativa viable, diferente a los modelos para realizar proyecciones que involucren el calentamiento global (IPCC, 2007). El uso de los modelos permite un enfoque sistemático con el objetivo de cerrar la brecha existente entre la teoría y las observaciones (Yang et al, 2005). Sin embargo, los modelos basados en estadísticas que utilizan datos históricos, son alternativas posibles (Malham, 2000). Los resultados pueden no ser exactos cuando se aplican a los escenarios climáticos futuros que se encuentran fuera del rango de las condiciones climáticas capturadas en el registro histórico (Gardner, 2009)

La simulación de los efectos hidrológicos del cambio climático requiere el uso de modelos climáticos, que incluyen los efectos climáticos de la concentración atmosférica creciente de gases de efecto invernadero; los modelos hidrológicos, que simulan los impactos hidrológicos del cambio climático y las técnicas de reducción de escala para vincular los modelos (Xu, 2004). La Figura 1.17 esquematiza los modelos para la evaluación de las respuestas hidrológicas al cambio climático.

Los tipos generales de estudios de impacto del cambio climático difieren en la forma en que las hipótesis acerca de la dirección y la magnitud del cambio climático pueden ocurrir en el área de estudio (Adger & al, 2007). Un enfoque consiste en utilizar los escenarios hipotéticos, en los cuales la temperatura y la precipitación se cambian por valores fijos con carácter anual, estacional o escalas mensuales (IPPC, 2007). Varios escenarios han adaptado las predicciones climáticas para el doble de CO_2, el cual se ha convertido en un estándar (Loaiciga et al., 1996). Este enfoque evita la incertidumbre asociada con modelos de circulación general y permite una estimación de la cantidad de cambio en una variable hidrológica como resultado de una serie de cambios incrementales en una variable climática; este tipo de análisis de impacto es de gran utilidad con el propósito de determinar que tanto el clima debe cambiar para que los impactos

significativos se produzcan. Los cambio se seleccionan no de manera arbitraria, sino basando en algunos datos, tales como anomalías en el registro histórico o cambios predichos por los modelos climáticos para la región (Praskievicz & Chang, 2009)

Figura 1.17: Modelos hidrológicos para la evaluación de respuestas al cambio climático



Adaptado: (Xu et.al, 2004)

Los métodos de modificación de las condiciones presentes son ampliamente utilizados por los hidrólogos (Xu et.al, 1999; Xu & Singh, 2004; Yaoling et. al., 2009; Prakievicz & Chang, 2009). Se efectúan pronósticos de los efectos del cambio climático en el caudal, basados únicamente en los registros históricos de la descarga y las condiciones climáticas en cuencas hidrográficas (Xu, and Singh 2004; Prakievicz & Chang, 2009). El procedimiento general para la estimación de los impactos del cambio climático hipotético sobre el comportamiento hidrológico propuesto por Xu et.al. (1999, 2004) es el siguiente:

- Determinar los parámetros de un modelo hidrológico en la cuenca de estudio con entradas actuales climáticas y flujos observados de un río para validación del modelo.
- Perturbar las series históricas de los datos climáticos, de acuerdo a algunos escenarios de cambio climático (por lo general, para la temperatura por la adición de ΔT = +1, +2, +4, y para la precipitación multiplicar los valores por (1 + ΔP /100)).
- Simular las características hidrológicas de la cuenca bajo el clima perturbado utilizando el modelo hidrológico calibrado.
- Comparar las simulaciones del modelo actual y el futuro hidrológico posible.

Varias herramientas de software se encuentran disponibles para la evaluar los impactos y las adaptaciones de los recursos hídricos al cambio climático, enfocados en el análisis del abastecimiento y demanda regional de agua. Incluyen modelos físicos de hidrología de cuencas como el SWAT y el HEC-HMS, modelos hidrodinámicos que pueden simular dinámicas de cauces

de ríos tales como la extensión de la elevación del agua y de inundación; y modelos de planificación. Para la simulación hidráulica se tienen algunos modelos como (IPCC, 2007): HEC-RAS, MIKE21, Delft3d. Entre los modelos de Planificación hidrológica se encuentran (IPCC 2007, Vicuña 2006): WEAP21, Aquarius, SWAT, IRAS (Interactive River and Aquifer Simulation), RIBASIM, MIKE 21 and BASIN, HEC-ResSim. La Tabla 1.1 presenta algunos modelos empleados para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos.

Tabla 1.1: Modelos hidrológicos empleados en estudios de impacto del cambio climático

Autor	**Área/ cuenca**	**Área km^2**	**Modelo climático**	**Proyección**	**Modelo Hidrológico**
Frei et. al., 2002	New York	1180	HadCM2; CGCMal	2080	Thornthwaite Modelo conceptual de balance de agua
Loukas et. al., 2002	British Columbia	1150 -1194	CGCMal	2080-2100	Modelo de cuenca UBC
Eckhardt and Ulbrich, 2003	Europa Central	693		2090	SWAT = Soil and Water Assessment Tool
Christensen et. al., 2004	Rio Colorado	113.5	PCM	2070-2098	VIC = Variable Infiltration Capacity
Andreásson et.al., 2004	Suecia	1100 - 6000	HadCM2 ACHAM4 OPYC3 HasAM3H	2030	HBV = Hydrologiska Byråns Vatten-balansavdelning
Jiang et. al., 2007	China				Thornthwaite–Mather (TM), Vrije Universitet Brussel (VUB), Xinanjiang (XAJ), Guo (GM), WatBal (WM), and Schaake models (SM)
Andersen et. al., 2006	Dinamarca		ECHAM4/OPYC HIRHAM	2071–2100	Mike 11–TRANS
Thodsen, 2007	Dinamarca	23 – 814	HIRHAM RCM	2071-2100	NAM
Bae, 2008	Korea	43- 2293	ECHO-G NCAR/MM5	1960-2100	PRMS
Verhaar, et. al. 2007	Canadá	Longitud 15-17 km		2010-2100	SEDROUT

La mayoría de los estudios sobre recursos hídricos y cambio climático emplean un enfoque top-down (Yaoling et. al., 2009; IPCC, 2007), en el cual se desarrollan escenarios climáticos futuros para ser utilizados a nivel regional y luego, imponen esos cambios potenciales en sistemas de recursos hídricos para evaluar la confiabilidad del sistema. El enfoque bottom-up identifica las vulnerabilidades más críticas de un sector hídrico; articula las causas de esas vulnerabilidades; sugiere cómo el cambio climático, la variabilidad climática y los extremos del clima pueden o no afectar esas vulnerabilidades y finalmente, diseña un proceso analítico para dirigir mejor y resolver la vulnerabilidad ante la incertidumbre climática, con un enfoque preventivo (Brekke et al 2009; IPCC, 2007).

1.4.3 SIG para la caracterización de cuencas hidrográficas

Los Sistemas de Información Geográfica –SIG- son la evolución de los archivos cartográficos CAD, con la particularidad de que cada archivo (que puede incluir un polígono, una línea, un punto o una imagen), tiene asociada una base de datos con variables o características georreferenciadas, lo cual permite espacializar la información. En la actualidad, existen softwares de SIG como ArcGis, Mapwindow, Grass, GvSIG, Quatum GIS, entre otros. La extracción de las características hidrológicas a partir de un Modelo de Elevación Digital- MED se ha convertido en uno de los principales procedimientos de estos software (GIRS Center, 2010).

Los estudios hidrológicos que utilizan SIG requieren de MED, término general utilizado para describir la representación cartográfica digital de la tierra en cualquier forma, rejillas rectangulares o redes, redes triangulares, etc. Un MED consiste de una matriz bidimensional de números que representan la distribución espacial de las elevaciones en una cuadrícula regular; un conjunto de coordenadas x, y, z de una red irregular de puntos, o cadenas de contorno almacenadas en forma de pares de coordenadas x, y, a lo largo de las líneas de contorno, de los intervalos de elevación especificada. Los MED 1 x 1m, 30 x 30 m, 1 x 1 km son las estructuras de datos más utilizadas debido a su eficiencia computacional y bajos requerimientos de almacenamiento. (GIRS Center, 2010).

Un MED de muy alta resolución puede tener más detalle, pero requiere mayores necesidades de computo. La elección de la resolución del MED depende de la relación costo-efectividad y está limitada por la densidad de la fuente de datos, la complejidad del terreno y la aplicación requerida (Liu, 2008); dicha resolución se limita por la densidad de datos de entrada del terreno. El número de celdas (S) debe ser más o menos equivalente a la cantidad de puntos de datos sobre el terreno (n) dentro del área (A) a cubrir por el MED. El tamaño de la cuadrícula (S) del MED se puede estimar mediante la siguiente ecuación (GIRS Center, 2010):

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \qquad \text{Ec. (1-35)}$$

Los MED disponibles en la red, pueden producir redes de corriente que son incompatibles con representaciones vectoriales generalmente aceptadas (GIRS Center, 2011). Estas inconsistencias se deben a problemas de escala del mapa y a la inadecuada resolución vertical del MED, en especial en áreas de bajo relieve (Zhu, Tian, & Zhao, 2006). Deben emplearse métodos de corrección, que utilizan diferentes algoritmos como el “stream burning” (Sanders, 1999) y el reacondicionamiento de la superficie o “Agree” (Hellweger, 1997).

Otros problemas que han sido detectados en los MED incluyen la introducción errónea de redes paralelas a la red de drenaje (Hellweger, 1997) y la distorsión de los límites de la cuenca (GIRS Center, 2011). Por tanto, para llevar a cabo la delimitación de la línea de drenaje en un MED, la superficie debe estar hidrológicamente conectada; es decir, cada celda debe fluir a la celda aguas abajo. Esta conectividad puede estar interrumpida por depresiones cerradas (pozos o sumideros) y zonas planas (Martz & Garbrecht, 1999), las cuales truncan la longitud del flujo y alteran su dirección (GIRS Center, 2011). Estos problemas pueden ser causados por la limitada resolución

vertical y espacial de los datos o por errores en la recolección o entrada de los datos de elevación o resultantes de la interpolación de los datos generados por el MED (Garbrecht & Martz, 1999; Lindsay & Creed, 2005).

Las depresiones deben ser llenadas como un primer paso para el análisis del drenaje (GIRS Center, 2011; Grimaldi et.al., 2007). Una serie de algoritmos han sido propuestos para esta corrección (O´Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988; Martz & Jong, 1988). Sin embargo, los software SIG como Arcinfo (ESRI, 1999), TAUDEM (Tarboton, 1997) y GRASS-GIS tienen implementado el algoritmo de Jenso & Domingue (1988), el cual consiste en llenar los sumideros mediante el incremento de los valores de las celdas de cada depresión con el valor más bajo en el límite de la depresión; por tanto, se asumen que todas las depresiones son causadas por subestimación de la elevación (Bartak, 2009).

Una vez se dispone de un MED corregido, es posible hacer uso de la información secundaria, la cual se extrae de forma automática en los SIG. Software modernos como ArcGis, Mapwindow, Grass, etc, permiten no sólo realizar la corrección hidrológica del MED, sino generar los mapas necesarios para los estudios hidrológicos e hidráulicos como: áreas acumuladas, direcciones de flujo, longitudes del flujo, clasificación de los cauces y red de drenaje, entre otros. La delimitación de la red de drenaje y de las cuencas requiere información sobre el paisaje y las propiedades hidrológicas como la elevación, la dirección de flujo y los flujos acumulados. Los algoritmos que se han desarrollado para obtener las características básicas de topografía o del MED incluyen la delimitación de las cuencas hidrográficas (Wu, Li, & Huang, 2008).

La incertidumbre del MED se traduce directamente en la precisión y la incertidumbre de cualquier característica hidrológica (Kenward et.al., 2000; GIRS Center, 2011). Se recomienda el uso de datos topográficos recientes y de alta precisión, a escalas apropiadas, que capturan la variabilidad del terreno (Sanders, 2007).

La posición de la red fluvial se puede estimar por medio de un MED, cuando se conoce la posición real a partir de un mapa topográfico. Las corrientes pueden ser definidas usando el mapa de flujo acumulado y mediante la aplicación de un valor umbral para la red; por ejemplo para un MED 30 m x 30 m es de 3 arc-segundos (GIRS Center, 2011). La precisión de las características del drenaje obtenidas del MED, es función de la calidad y resolución y de los algoritmos empleados en el procesamiento. Para muchas aplicaciones, el MED USGS 30 m x 30 m ha cumplido con los estándares de precisión; en cuanto a su precisión vertical es ±7 m, lo cual puede generar errores en pendiente, comparables con los asociados a la agregación espacial (GIRS Center, 2011).

2. Metodología

2.1 Objetivos

Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de Cambio Climático

Objetivos Específicos

- Calcular el balance hídrico para condiciones hidrológicas medias y secas y las distribuciones mensuales correspondientes.
- Determinar el índice de escasez o uso de agua para condiciones hidrológicas con comportamiento hidroclimático medio como seco.
- Proyectar la vulnerabilidad del recurso hídrico para condiciones estacionarias a través de la relación demanda-oferta, para el período 2011-2040.
- Estimar la vulnerabilidad del recurso hídrico bajo los escenarios de cambio climático para el período 2011-2040

2.2 Metodología

La metodología empleada en el estudio para la caracterización de la cuenca del río Chinchiná y el análisis de vulnerabilidad se presenta en la Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquema metodológico

2.2.1 Caracterización de la cuenca – Metodología.

Caracterización física- Metodología

Las características físicas de la cuenca del río Chinchiná fueron compiladas a partir de la revisión de fuentes primarias y secundarias, en especial, los estudios de ordenamiento de la subcuenca del río Chinchiná reportados por la Corporación Autónoma Regional de Caldas- CORPOCALDAS (2005).

Los Sistemas de Información Geográfica, SIG, se emplearon para generar los mapas requeridos en el estudio hidrológico, partiendo del Modelo de Elevación Digital- DEM, el cual fue tomado de la USGS "United States Geological Survey", con una resolución de tamaño de celda de 30 m x 30 m. El DEM fue corregido con las herramientas disponibles en el ArcGis; este software fue utilizado para generar los mapas de pendientes, áreas acumuladas, direcciones de flujo, longitudes del flujo, número de orden o clasificación de los cauces, red de drenaje y subcuencas.

Para la delimitación de las cuencas, se tomó como referencia las estaciones de Caudal, 4 en total, cuya información fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)-Estaciones Chupaderos y El Retiro- y por la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC- Estaciones Sancancio y Montevideo-.

La red de drenaje fue obtenida del mapa de direcciones de flujo, mediante el Software ArcGis. No se detectaron errores, en virtud del buen desempeño de las herramientas SIG en zonas montañosas. Se efectuó la revisión de las áreas de drenaje estimadas por SIG, con las reportadas en la cartografía disponible, sin encontrar diferencias sustanciales.

Los mapas geológicos y de textura de suelos fueron digitalizados, usando el ArcGis, tomando como referente la información reportada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y CORPOCALDAS. El mapa de cobertura y usos de suelos fue digitalizado en ArcGis basado en la información suministrada por CORPOCALDAS.

Caracterización climática- Metodología

El análisis de las variables climatológicas fue realizado a partir de los registros diarios de las estaciones meteorológicas (12) y pluviométricas (12) ubicadas en la cuenca, administradas por El IDEAM, La CHEC, El Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE) y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Fueron seleccionadas las estaciones con registros como mínimo desde la década del 80, para la caracterización climática del periodo 1981-2010; se consideraron además, otras estaciones con menor tiempo de registro, para una mejor caracterización del área de estudio, como las ubicadas en la parte alta de la cuenca y las del Parque Natural de los Nevados. En la Tabla 2.1 se muestra

el listado de las estaciones, cuya información fue analizada en el estudio y en la Figura 2.2 su localización en la cuenca.

Tabla 2.1: Estaciones meteorológicas y pluviométricas

No	*Estación*	*Fuente*	*Altitud*	*Latitud N*	*Longitud W*	*X*	*Y*
1	El Cisne	UNAL	4830	4° 49´ 14.22"	75° 21´ 35,87"	1190938,348	1024742,915
2	Nereidas	UNAL	4470	4° 52´ 50,81"	75° 21´ 25,15"	1191251,941	1031399,722
3	Molinos	UNAL	4260	4° 54´ 35.27"	75° 21´48,16"	1190534,453	1034608,195
4	Rio Claro	UNAL	4183	4° 50´ 43,38"	75° 22´ 21,24"	1189533,0	1027479,278
5	Las Brisas	IDEAM	4150	4° 55´ 59,99"	75° 21´	1192012,2	1037215,532
6	Letras	CENICAFE	3684	5° 3´	75° 20´	1193827	1050128
7	La Esperanza	IDEAM	3420	5° 1´	75° 21´	1191988,086	1046435,39
8	Papayal	IDEAM	2245	4° 57´	75° 29´	1177213,06	1039022,7
9	Posgrados	UNAL	2162	5°3´22,2"	75° 29´32,3"	1176198,4	1050759,0
10	Agronomía	CENICAFÉ	2088	5° 3´	75° 30´	1175337,2	1050080,85
11	Alta Suiza	CHEC	2055	5° 3´ 9"	75° 29´	1177185,49	1050361,93
12	Neira	CHEC	1902	5° 10´ 47,11"	75° 31´ 45,40"	1172054,6	1064427
13	Marmato	CHEC	2000	5° 3´ 58,8"	75° 3´ 54"	1173317,53	1051882,85
14	Planta Sancancio	CHEC	1850	5° 2´ 17"	75° 28´59"	1177220,22	1048764,06
15	Estación Uribe	CHEC	1842	5° 2´ 54,25"	75° 32´ 1,58"	1171591	1049895
16	Java	CENICAFÉ	1778	5° 1´	75° 32´	1171648,1	1046384,49
17	El Recreo	CENICAFÉ	1430	5° 2´	75° 39´	1158701,37	1048198,7
18	Naranjal	CENICAFÉ	1381	4° 58´	75° 39´	1158717,43	1040824,16
19	Montevideo	CHEC	1370	4° 59´46,8"	75° 34´31,8"	1166975,32	1044124,28
20	La Selva	CENICAFE	1312	5 05	75 36	1164235,41	1053742,1
21	Cenicafé	CENICAFE	1310	4° 59´	75° 36´	1164256,35	1044523,71
22	Granja Luker	CENICAFÉ	1031	5° 4´	75° 41´	1154995,76	1051877,92
23	Santágueda	CENICAFÉ	1026	5° 4´	75° 40´	1156844,5	1051881,93
24	Arauca	IDEAM	890	5° 4´	75° 40´	1158717	1057446

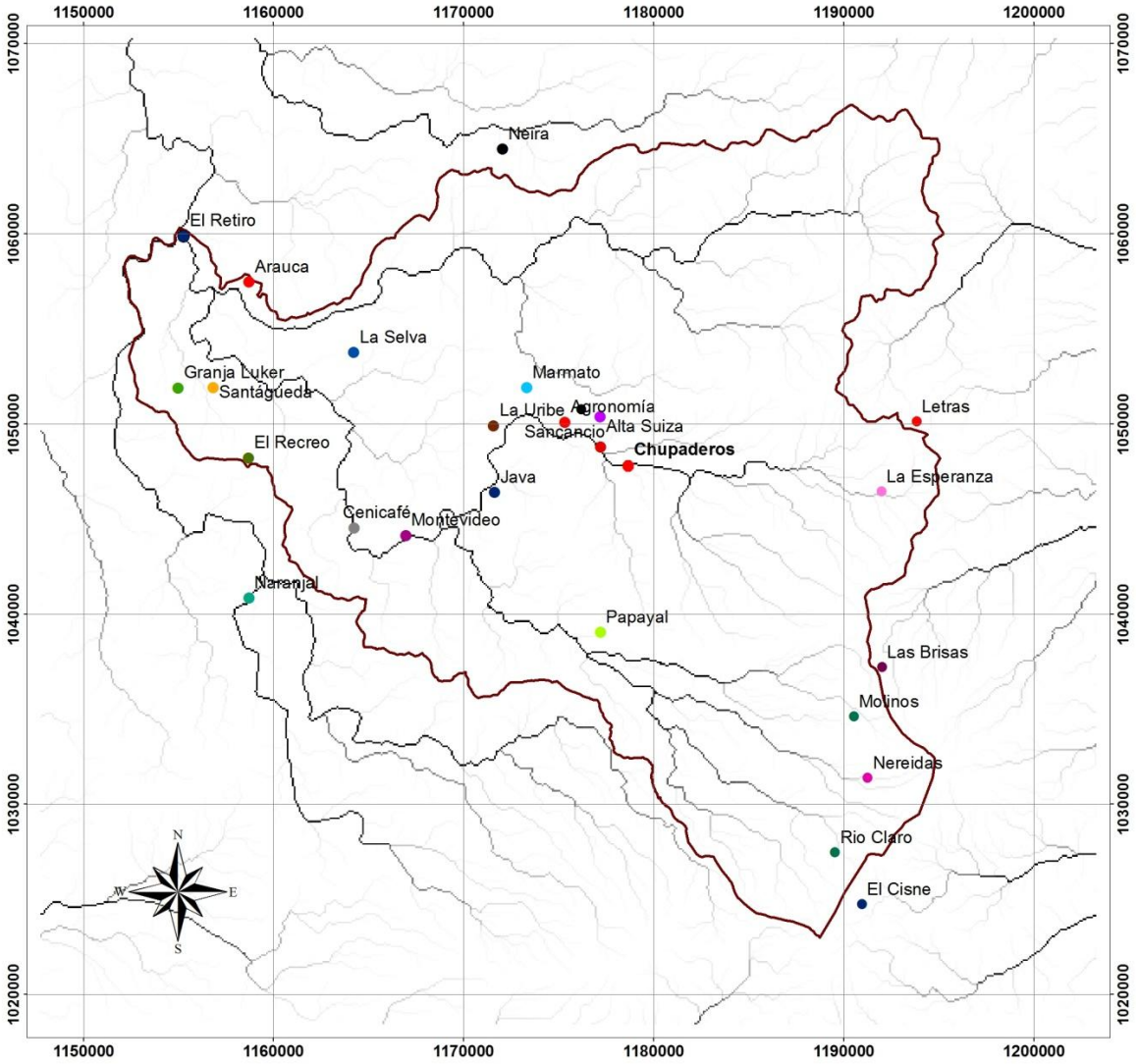
Las estaciones Letras, Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santagueda cuentan con registros de temperatura, humedad relativa, brillo solar y precipitación; las estaciones El Cisne y Posgrados poseen información de temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación; las estaciones de páramo: Nereidas, Molinos, Las Brisas y Río Claro disponen de registros de temperatura y precipitación; las demás estaciones solo tienen mediciones de lluvia.

Las variables climáticas analizadas fueron brillo solar, humedad relativa, precipitación y temperaturas (máximas, mínimas y promedio), para las cuales se realizaron los análisis de estadística descriptiva, considerando el período 1981-2010, a escala diaria, mensual y anual, empleando el software SSPS.

La radiación solar fue calculada a escala diaria, en cada una de las estaciones, partiendo de los registros de brillo solar y humedad relativa, empleando los modelos matemáticos que se presentan en la Tabla 2.2. Para efectos de selección del modelo, se tuvo en cuenta las mediciones de radiación solar de la estación Posgrados, los cuales por su cercanía, fueron

comparados con la estación Agronomía. Fue realizado el análisis de estadística descriptiva a escala diaria, mensual y anual.

Figura 2.2: Ubicación de estaciones meteorológicas y pluviométricas



La distribución espacial de las variables climáticas fue efectuada aplicando la técnica de interpolación por método del inverso de la distancia al cuadrado; si bien pueden aplicarse métodos de interpolación lineal hasta interpolación óptima o Métodos de Gadin (1965), los cuales se encuentran bien desarrollados y hacen parte de las herramientas de los SIG; el método del inverso de la distancia al cuadrado ha sido validado para el área de estudio (Cortes, 2010) y recomendado por bibliografía especializada (Tabios & Salas, 1985).