



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA**

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN  
HIDROELÉCTRICA CON ENFASIS EN PROYECCIONES DE GENERACIÓN-  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA EN COLOMBIA.**

TESIS  
PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**DOCTOR EN FÍSICA DE LA ATMÓSFERA**

PRESENTA

M. en C. JESUS EFREN OSPINA NOREÑA



TUTOR: Dr. Carlos Gay García

AÑO: 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CON  
ENFASIS EN PROYECCIONES DE GENERACIÓN-TRANSMISIÓN ELECTRICA EN  
COLOMBIA.

Jesús Efren Ospina Noreña

Director:

Dr. Carlos Gay García. Director del Centro de Ciencias de la Atmósfera. Posgrado de Ciencias  
de la Tierra. UNAM

Presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Física de la Atmósfera.

Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Ciencias de la Atmosfera

Posgrado de Ciencias de la Tierra

2009

*Algo extraordinario de la ciencia, es poder descender cada vez más en la profundidad de la  
ignorancia*

*Efren Ospina N.*

## DEDICATORIA

*Dedico A:*

*La memoria de mis seres ausentes, A mi Madre,  
hermanos y hermanas, Marta, mis hijos  
Marión y Esteban, por su compañía,  
quienes siempre están y estarán presentes en mis modestos esfuerzos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi constante y eterno guía.

A mi director Dr. Carlos Gay García. Por su compromiso, dedicación y orientación académica, por su constante contribución a mi espíritu investigador y crecimiento personal.

A la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) México, por su colaboración, apoyo y financiación brindada para el desarrollo de la investigación.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM, por la beca otorgada del “Programa de Fomento a la Graduación de los Alumnos de Posgrado”.

Al IDEAM por la información y bases de datos brindadas, las cuales son insumos fundamentales de la presente investigación.

A los Doctores Cecilia Conde, Gerardo Sánchez Torres Esqueda, Víctor O. Magaña, y todos los que contribuyeron en mi formación, por su interés y ayuda incondicional siempre disponible.

Al grupo de trabajo del Centro de Ciencias de la Atmósfera por su atención y continua colaboración.

A los Doctores Hugo Albeiro Saldarriaga, Jimmy Alexander Morales, Omar Amador Muñoz, Mario Murillo Tovar, por su incondicional amistad, su apoyo moral y espiritual, disponibilidad, atención y colaboración prestada en el desarrollo de la investigación.

A todos mis familiares, compañeros y amigos por sus conocimientos departidos y aportes siempre oportunos.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	21
2.1 <i>Medio ambiente integral</i> .....	21
2.1.1. <i>Gestión ambiental</i> .....	22
2.1.2. <i>Cambio climático</i> .....	25
2.1.3. <i>Sensibilidad, capacidad de adaptación y vulnerabilidad al cambio climático.</i> .....	26
2.1.3.1. <i>Sistemas humanos sensibles y/o vulnerables al cambio climático</i> .....	27
2.1.3.2. <i>Efectos sobre los recursos hidrológicos e hídricos y su vulnerabilidad</i> .....	29
2.1.3.3. <i>Vulnerabilidad de los asentamientos humanos, energía e industria</i> .....	34
2.1.4. <i>Vulnerabilidad regional</i> .....	36
2.1.4.1. <i>Vulnerabilidad y capacidad de adaptación en América Latina</i> .....	37
2.1.5. <i>Métodos e instrumentos utilizados en la evaluación de impactos del cambio climático.</i> ....	38
2.1.5.1. <i>Anticipación a los efectos de futuros cambios climáticos</i> .....	38
2.1.5.2. <i>Evaluación integrada</i> .....	39
2.1.6. <i>Escenarios de cambio y su función</i> .....	40
2.1.6.1. <i>Escenarios socioeconómicos, de uso del suelo y ambientales</i> .....	41
2.1.6.2. <i>Escenarios climáticos</i> .....	43

---

2.1.6.3. Escenarios del siglo XXI.....	44
2.1.7. América Latina y variabilidad climática.....	46
2.1.7.1. Cambio climático y recursos hídricos .....	47
2.1.8. Necesidades de información.....	50
2.1.9. Simulación del sistema climático y sus cambios .....	51
2.1.9.1. Modelos climáticos, ¿Cómo se construyen y cómo se aplican?.....	52
2.1.9.2. Técnicas de regionalización .....	54
2.2. MÉTODO.....	56
2.2.1. Situación geográfica de Colombia. ....	56
2.2.2. Clima.....	57
2.2.2.1. Radiación solar.....	57
2.2.2.2. Temperatura del aire.....	59
2.2.2.3. Precipitación.....	60
2.2.2.4. Patrón general de lluvias .....	62
2.2.2.5. Evapotranspiración potencial .....	62
2.2.3. Oferta hídrica en Colombia .....	63
2.2.3.1. Balance hídrico nacional .....	63
2.2.3.2. Cuantificación de la oferta hídrica .....	66
2.2.3.2.1. Oferta hídrica en cuencas hidrográficas .....	68
2.2.4. Demanda hídrica.....	68



---

2.2.4.1. Cuantificación de la demanda y los usos del agua .....	69
2.2.5. <i>Relaciones demanda, oferta y vulnerabilidad</i> .....	73
2.2.5.1. Indicadores que caracterizan el recurso hídrico .....	73
2.2.5.2. Índice de escasez .....	74
3. METODOLOGÍA .....	75
3.1. <i>Fase 1. Recopilación de información.</i> .....	75
3.2. <i>Fase 2. Proyecciones, simulación y comparación de modelos.</i> .....	77
3.3. <i>Fase 3. Sensibilidad y vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico</i> .....	80
3.4. <i>Fase 4. Análisis de la relación oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú.</i> .....	82
3.5. <i>Fase 5. Recurso hídrico como factor limitante y optimización de la generación hidroeléctrica como estrategia de adaptación.</i> .....	83
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	87
4.1. <i>Análisis y comportamiento actual de las variables</i> .....	87
4.2. <i>Proyecciones cuenca del Bajo Magdalena.</i> .....	92
4.3. <i>Proyecciones cuenca del Sinú_Caribe.</i> .....	103
4.4. <i>Balance hídrico.</i> .....	112
4.5. <i>Estimación del aporte de caudal del Río Sinú a la represa Urrá 1</i> .....	115
4.6. <i>Comparación de modelos y análisis de sensibilidad del sistema</i> .... ..	116
4.7. <i>Sensibilidad y vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico</i> .....	119
4.8. <i>Propuesta de un índice de vulnerabilidad.</i> .....	128

---

<i>4.9. Análisis de la relación oferta/demanda bajo escenarios de cambio climático.</i> .....	134
<i>4.9.1. Cálculo de las demandas del recurso hídrico.</i> .....	139
<i>4.9.2. Análisis de las proyecciones de la relación oferta_demanda del recurso hídrico y comparación de modelos, mediante la aplicación del WEAP.</i> .....	141
<i>4.9.3. Demanda insatisfecha y porcentaje de cobertura.</i> .....	148
<i>4.9.4. Incorporación de estrategias de manejo y adaptación.</i> .....	154
<i>4.10. Recurso hídrico como factor limitante.</i> .....	158
<i>4.11. Efectos de la optimización de generación de energía hidroeléctrica sobre la relación oferta_demanda en la Cuenca del Sinú_Caribe.</i> .....	164
<i>4.11.1. Análisis costo/beneficio de la aplicación de alternativas de optimización.</i> .....	169
5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS .....	172
6. BIBLIOGRAFÍA.....	180
ANEXOS.....	187

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas. ....</i>	77
<i>Tabla 2. Precipitación proyectada Cuenca del Bajo Magdalena. ....</i>	94
<i>Tabla 3. Aumento y/o disminución de la precipitación en %. ....</i>	96
<i>Tabla 4. Anomalías de temperatura máxima Cuenca del Bajo Magdalena. ....</i>	99
<i>Tabla 5. Temperatura máxima actual y proyectada Cuenca del Bajo Magdalena. ....</i>	101
<i>Tabla 6. Precipitación actual y proyectada Cuenca del Sinú_Caribe. ....</i>	104
<i>Tabla 7. Aumento y/o disminución de la precipitación en % Cuenca Sinú-Caribe ....</i>	104
<i>Tabla 8. Anomalías de temperatura máxima Cuenca del Sinú_Caribe. ....</i>	108
<i>Tabla 9. Temperatura máxima actual y proyectada Cuenca del Sinú_Caribe.....</i>	109
<i>Tabla 10. Aporte de caudal observado y estimado al embalse Urrúl. ....</i>	116
<i>Tabla 11. Calculo de evaporación neta diferentes modelos y experimentos, periodo 2010-1039.....</i>	121
<i>Tabla 12. Cálculo de generación hidroeléctrica y sus variables relacionadas de acuerdo a las proyecciones de los diferentes modelos Periodo 2010-2039. Escenarios A2 .....</i>	122
<i>Tabla 13. Cambios en generación hidroeléctrica y sus variables relacionadas.....</i>	124
<i>Tabla 14. Volumen almacenado y porcentaje de cambio, diferentes escenarios.....</i>	126
<i>Tabla 15. Criterios para la elaboración del índice de vulnerabilidad.....</i>	128
<i>Tabla 16. Cálculo de Tmaxr.....</i>	129
<i>Tabla 17. Cálculo de PCPr.....</i>	129
<i>Tabla 18. Índice de vulnerabilidad de generación hidroeléctrica. ....</i>	130
<i>Tabla 19. Valores de las variables para el análisis de la relación oferta_demanda y el I.P.....</i>	132
<i>Tabla 20. Proyecciones oferta_demanda e I.P. Cuenca del Sinú_Caribe. ....</i>	132
<i>Tabla 21. Variables para el cálculo oferta_demanda y sus proyecciones, según el Ideam. ....</i>	134

---

<b>Tabla 22.</b> <i>Población en la Cuenca del Sinú_Caribe.</i> .....	136
<b>Tabla 23.</b> <i>Pesos para el cálculo del escenario de caudales promedio ponderado.</i> .....	137
<b>Tabla 24.</b> <i>Proyecciones de las variables climáticas_hidrológicas periodo 2010-2039, diferentes escenarios. Toda la Cuenca.</i> .....	138
<b>Tabla 25.</b> <i>Demanda de agua Cuenca del Sinú_Caribe.</i> .....	140
<b>Tabla 26.</b> <i>Demanda sectorial proyectada por municipio.</i> .....	143
<b>Tabla 27.</b> <i>Oferta sectorial requerida por municipio.</i> .....	145
<b>Tabla 28.</b> <i>Suministro entregado por municipio, diferentes escenarios al año 2039</i> .....	150
<b>Tabla 29.</b> <i>Demanda municipal insatisfecha, diferentes escenarios al año 2039.</i> .....	151
<b>Tabla 30.</b> <i>Resumen del efecto del cambio climático en el tiempo sobre RO y DI.</i> .....	160
<b>Tabla 31.</b> <i>Resumen del efecto del cambio climático en el tiempo sobre SE y DI.</i> .....	162
<b>Tabla 32.</b> <i>Evolución del IE en el tiempo.</i> .....	163
<b>Tabla 33.</b> <i>Valores para la generación de escenarios de optimización de la generación de energía eléctrica. ...</i>	165
<b>Tabla 34.</b> <i>Resumen de los cambios en generación eléctrica, volumen almacenado y demanda insatisfecha.</i> .....	168
<b>Tabla 35.</b> <i>Variables económicas relacionadas a los efectos del cambio climático y alternativas propuestas en la generación de energía en Urrá 1</i> .....	169
<b>Tabla 36.</b> <i>Análisis costo/beneficio de los efectos del cambio climático y alternativas de adaptación sobre la generación de energía hidroeléctrica</i> .....	170

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Esquema del procedimiento metodológico. ....	86
<b>Figura 2.</b> Ubicación área de estudio. ....	88
<b>Figura 3.</b> Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones 2904511, 2906503 y 2903511(celda 10°N-75°W).....	89
<b>Figura 4.</b> Variaciones mensuales de temperatura en las estaciones 2904511, 2906503 y 2903511(celda 10°N-75°W). a) Temperatura máxima. b) Temperatura mínima. ....	90
<b>Figura 5.</b> Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones 1307502 y 2502524, (celda 7.5°N-75°W).....	91
<b>Figura 6.</b> Variaciones mensuales de temperatura en las estaciones 1307502 y 2502524, (celda 7.5°N-75°W). a) Temperatura máxima. b) Temperatura mínima.....	92
<b>Figura 7.</b> Precipitación actual y proyectada Cuenca del Bajo Magdalena, escenario A2. ....	95
<b>Figura 8.</b> Escenarios de anomalías mensuales de precipitación Cuenca del Bajo Magdalena. ....	96
<b>Figura 9.</b> Número de veces que se rebasa un umbral de 40 mm, periodo 1975-2000 y 2070-2099, Bajo Magdalena.....	97
<b>Figura 10.</b> Escenarios de anomalías de temperatura máxima, utilizando HadCM3, A2 y B2 ....	99
<b>Figura 11.</b> Comparación temperatura máxima esperada, proyecciones HadCM3, escenario A2 y B2. ....	101
<b>Figura 12.</b> Proyección temperatura media, periodo 2070-2099, escenarios A2 y B2.....	102
<b>Figura 13.</b> Proyección temperatura mínima, HadCM3_A2, todos los periodos.....	103
<b>Figura 14.</b> Escenarios de anomalías de la precipitación acumulada mensual, Cuenca del Sinú-Caribe. ....	105
<b>Figura 15.</b> Número de veces que se rebasa un umbral de 50 mm, periodo 1975-2000 y 2070-2099, Sinú_Caribe. ....	106
<b>Figura 16.</b> Escenarios de anomalías de temperatura máxima, utilizando HadCM3, A2 y B2, Cuenca del Sinú-Caribe.....	108

<b>Figura 17.</b> Comparación temperatura máxima esperada, proyecciones HadCM3, escenarios A2 y B2. Cuenca Sinú-Caribe .....	110
<b>Figura 18.</b> Proyección temperatura media, periodo 2070-2099, escenarios A2 y B2. Cuenca Sinú-Caribe .....	111
<b>Figura 19.</b> Proyección temperatura mínima, HadCM3_A2, todos los periodos. Cuenca del Sinú-Caribe. ....	112
<b>Figura 20.</b> Balance Hídrico. a) Humedad del suelo actual y proyectada, Cuenca del Bajo Magdalena. b) Humedad del suelo. c) superávit actual y proyectado, Cuenca del Sinú-Caribe. ....	114
<b>Figura 21.</b> Diagrama de dispersión para temperatura media_precipitación. a) Periodo 2010-2039. b) Periodo 2040-2069.....	117
<b>Figura 22.</b> Diagrama de dispersión temperatura máxima_precipitación, escenario A2. a) Periodo 2010-2039. b) Periodo 2040-2069.....	119
<b>Figura 23.</b> Reducciones en %, para el periodo 2010-2039. a) Generación eléctrica. b) Volumen almacenado en presa. ....	126
<b>Figura 24.</b> Proyecciones de generación mensual de energía eléctrica, represa Urrá1, 2010-2039. ....	127
<b>Figura 25.</b> Proyecciones oferta_demanda e I.P.....	133
<b>Figura 26.</b> Ubicación del área de estudio y centros de demanda.....	135
<b>Figura 27.</b> Requerimiento de la oferta y suministro entregado, Cuenca del Sinú_Caribe, periodo 2010-1039..	142
<b>Figura 28.</b> Relación de la demanda del recurso hídrico en la Cuenca, oferta requerida y suministro entregado. ....	147
<b>Figura 29.</b> Demanda insatisfecha total Cuenca del Sinú_Caribe.....	149
<b>Figura 30.</b> Demanda sectorial en Montería, periodo 2010-2039.....	152
<b>Figura 31.</b> a) Cobertura de la demanda periodo 2010-2039. b) Relación oferta_demanda en Montería y sus correspondientes variables, escenario promedio ponderado.....	153
<b>Figura 32.</b> a) Relación oferta_demanda total Municipio de Montería. b) Comparación oferta requerida por sector, escenarios promedio ponderado y adaptación1. ....	155
<b>Figura 33.</b> Comparación escenario promedio ponderado y adaptacion1, periodo 2010-2039.....	157
<b>Figura 34.</b> Factor limitante para la proyección oferta requerida_demanda insatisfecha.....	160

---

<i>Figura 35. Factor limitante para la proyección suministro entregado_demanda insatisfecha. ....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 36. Ubicación sitio de Bombeo. ....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 37. Volumen almacenado en presa bajo escenarios de adaptación y/o mitigación. ....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 38. Generación eléctrica bajo escenarios de adaptación y/o mitigación. ....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 39. DI en la Cuenca teniendo en cuenta los escenarios de optimización de generación eléctrica. ....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 40. Cambios en generación eléctrica, volumen almacenado y demanda insatisfecha. ....</i>	<i>168</i>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<i>ANEXO I. Distribución de algunas variables hidrológicas-meteorológicas en Colombia.....</i>	187
<i>ANEXO II. Distribución de las variables relacionadas con el balance hídrico en Colombia.....</i>	191
<i>ANEXO III. Índices con relación a la oferta-demanda de los recursos hídricos.....</i>	194
<i>ANEXO IV. Aspectos técnicos, operativos y batimetría de la represa Urrá 1.....</i>	195
<i>ANEXO V. Escenarios de desarrollo económico (SRES; IPCC, 2001) .....</i>	197
<i>ANEXO VI. Análisis estadísticos.....</i>	198
<i>ANEXO VII. Ilustración de proyecciones climáticas entre escenarios.....</i>	199
<i>ANEXO VIII. Proyecciones RO, SE y DI al 2100.....</i>	202
<i>ANEXO IX. Productos generados .....</i>	205



## RESUMEN

En este trabajo se identifican algunas variables climático-hidrológicas que mejor expresan la vulnerabilidad<sup>1</sup> de los recursos hidrológicos a nivel de cuencas (Cuenca del Bajo Magdalena y Sinú-Caribe, Colombia); se selecciona y aplican modelos de circulación general, bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero (A2 y B2); se utilizan modelos de reducción de escala (SDSM, Statistical Downscaling Model) que permiten observar los cambios climáticos a nivel local; se aplica el Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés), el cual es una aproximación integrada para simular sistemas del agua y orientar políticas de manejo, además de análisis matemáticos y aplicación de métodos estadísticos, así, el estudio visualiza y analiza la incidencia del potencial cambio climático sobre el sector hidroeléctrico, encontrando el grado de vulnerabilidad del mismo o cualquier sector que tenga el agua como fuente, brinda herramientas, estrategias y criterios para planear y direccionar las proyecciones en los diferentes sectores productivos.

De otro lado se analiza la relación de oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú\_Caribe, teniendo en cuenta los valores actuales y proyectados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), se incluye los posibles cambios que puede experimentar dicha relación, de acuerdo al potencial cambio climático proyectado por algunos modelos de circulación general, con lo que se busca generar

---

<sup>1</sup> Se asume como los cambios, sean positivos o negativos, sobre los recursos hídricos y los sistemas relacionados con estos y no como la estricta definición dada por el IPCC.

elementos de juicio que permitan planear, manejar y direccionar las proyecciones actuales de ser necesario y elaborar estrategias adaptativas ante condiciones adversas.

Igualmente se presenta el análisis del recurso hídrico como factor limitante en el tiempo para las diferentes actividades en la región, bajo las condiciones actuales y los potenciales cambios climáticos proyectados, además se construyen escenarios para la optimización de la generación de energía eléctrica y se analiza el efecto de los mismos sobre la relación oferta\_demanda de los recursos hídricos en la Cuenca objeto de estudio.

Palabras Claves: Recursos hidrológicos, cuenca, modelos de circulación general, modelos de reducción de escala, sector hidroeléctrico, oferta, demanda, cambio climático.

## ABSTRACT

Climatic-hydrological variables that best express the vulnerability of water resources at the basin level (Bajo Magdalena and Sinú-Caribe Basins, Colombia) were identified in this study. General circulation models under different greenhouse effect gas emission scenarios (A2 and B2) were selected and applied. SDSM (Statistical Downscaling Models) enabled climate changes to be observed at the local level. The Water Evaluation And Planning System (WEAP) was utilized to integrate simulation of water systems with water resource management policies. Mathematical analyses and statistical methods were also applied to visualize the effects of potential climate changes on the hydroelectric power industry in order to evaluate the degree of vulnerability of the industry and of any industry using water. Tools, strategies and criteria for planning and managing forecasts for different industries were included.

On the other hand discusses the relationship of supply and demand of water resources in the basin of Sinú\_Caribe, taking into account the current and projected values by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) of Colombia, including possible changes you can experience such a relationship, according to potential climate change projected by some general circulation models, which seeks to generate evidence to plan, manage and direct current projections if necessary, and develop adaptive strategies to adverse conditions.

It also presents the analysis of water resources as a limiting factor in time for the various activities in the region, under the conditions current and potential projected climate changes, in addition, are built scenarios for the optimization of electric power generation, and discusses their effect on relationship supply\_demand of water resources in the basin under study.

Keywords: Water resources, basin, general circulation models, downscaling models, hydroelectric industry, supply, demand, climate change.

## 1. INTRODUCCIÓN

Toda actividad humana, en particular los proyectos de desarrollo, tiene influencia sobre el medio ambiente, por cambios y modificaciones en él. Para evitar que algunas actividades se conviertan en un impedimento para el desarrollo “sostenible”, es necesario crear mecanismos apropiados para contrarrestar y minimizar el impacto de dichas modificaciones.

Como consecuencia de la aguda y creciente crisis ambiental, surge la planificación y gestión ambiental, para discutir y analizar la problemática con perspectiva interdisciplinaria (meteorología, hidrología, forestal, ciencias naturales, entre otras) para desarrollar estrategias para un mejor manejo del entorno físico y biológico que rodea al ser humano. Por ello, diversas entidades estatales, privadas y mixtas, comprometidas en la planeación, formulación y ejecución de proyectos, deberán centrar sus esfuerzos y conocimientos para el desarrollo de políticas coherentes para la toma de decisiones, realización de estudios, ejecución de actividades, en síntesis, ejecución de acciones propias de esta área de estudio.

La creciente concentración poblacional, trae nuevas necesidades de tipo económico, social, productivo, comercial, entre otros, que generan un incremento en la demanda de energía y como resultado de la producción de la misma, surge un problema: el calentamiento global, producido por el incremento en la concentración de gases de invernadero en la

atmósfera: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, CH<sub>4</sub>, entre otros, provenientes del uso de hidrocarburos y combustibles fósiles (carbón, petróleo y sus derivados), leña, deforestación, etc.

En la actualidad y a futuro, se evidencian fenómenos ambientales de diversa índole: cambios en los regímenes hídricos, caudales, precipitación, temperatura, radiación solar, trayendo como resultado transformaciones económicas, sociales, ecológicas, culturales incluso, procesos de reordenamiento territorial y de los sectores productivos. Tales fenómenos, impredecibles en momentos, por ausencia y/o poca información, por falta de avances tecnológicos e investigación, generan incertidumbre al momento de la planificación, formulación, proyección, puesta en marcha y toma de decisiones en tales aspectos.

Contar con conocimientos adecuados, al contemplar los efectos del cambio climático en las diferentes etapas de formulación y proyección de proyectos de desarrollo, disminuye en gran medida la incertidumbre producida por este efecto.

Debido a que aproximadamente el 81.2% de la oferta de energía eléctrica en Colombia es de carácter hidroeléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, 2005), el estudio, pretende profundizar en el conocimiento de los impactos del calentamiento global sobre esta fuente de energía, con el fin de establecer parámetros que permitan minimizar sus nocivas consecuencias, elaborar propuestas metodológicas y mecanismos que disminuyan las incertidumbres, al momento de planear y ejecutar obras de infraestructura y políticas sociales. Así mismo pretende establecer como la vulnerabilidad de los recursos hidrológicos por causa

del cambio climático puede influir de forma directa sobre los elementos (generación y ordenamiento territorial) de análisis oferta- demanda y proyecciones del sector de generación y transmisión de energía eléctrica y otros sectores relacionados.

Por lo anterior, es necesario insistir en la búsqueda de soluciones altamente aproximadas a la gran problemática generada por el cambio climático, visualizar la incidencia de este fenómeno en el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas y, posibles potencialidades y/o el grado de vulnerabilidad del sector hidroeléctrico en Colombia o cualquier sector que tenga el agua como fuente.

Además, por lo general, en los estudios de posibilidades y restricciones ambientales, para los proyectos de expansión de los diferentes sectores, no se contemplan algunas variables importantes ni los efectos del cambio climático en aspectos fundamentales.

Por lo anterior en esta investigación se plantean las proyecciones oferta-demanda en el sector generación-transmisión de energía eléctrica (GTEE), identificando algunas variables climático-hidrológicas que mejor expresen o simulen la vulnerabilidad de los recursos hidrológicos en Colombia, se aplican modelos de circulación general acoplados y modelos de reducción de escala que permitan simular y observar los cambios climáticos a nivel local o regional, además se analizan las proyecciones y/o estudios actuales de la GTEE y las logradadas mediante el estudio de la vulnerabilidad de los recursos Hidrológicos.

Se considera que los modelos, análisis y resultados a pequeña escala o nivel regional presentados, son eficaces, eficientes, confiables y sirven para dar soporte a la planeación, formulación de proyectos, toma de decisiones y estudios en cuanto a la generación-transmisión de energía hidroeléctrica, además pueden dar soporte al plan de manejo ambiental y mayor eficiencia en la elaboración de los costos de gestión.

Estos resultados, análisis y proyecciones no solo sirven en las técnicas de generación de alternativas de localización en el sector hidroeléctrico, sino también como herramientas, estrategias y criterios para planear y direccionar las proyecciones en los diferentes sectores productivos relacionados al anterior (agrícola, forestal, industrial, comercial, turismo, entre otros), igualmente brindan elementos de juicio que permiten el diseño, elaboración y aplicación de normas y políticas, tendientes a obtener mejores planes de ordenamiento territorial, que incluya la minimización de impactos negativos en la construcción de proyectos de desarrollo, la prevención de desastres, entre otros, de tal forma que influya directamente en la construcción de una mejor legislación y gestión ambiental.



## **2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.**

### ***2.1 Medio ambiente integral***

Para Ángel et al (1997), el medio ambiente es integral, un ámbito natural y un medio humano como elementos fundamentales para definir la gestión ambiental en proyectos de infraestructura y actividades productivas. Para realizar esto se requiere un marco ambiental de referencia, ineludiblemente complejo desde el punto de vista ecológico y social. El medio ambiente integral se debiera concebir como resultado de la interacción entre los medios natural y humano.

Es importante resaltar la condición de complejidad, pues la ruptura de procesos ecosistémicos debida a los impactos causados por proyectos de infraestructura y actividades productivas, trae a su vez la alteración de la vida de grupos humanos dependientes de dichos ecosistemas o de algún recurso natural cuya existencia depende del funcionamiento de ellos.

Según Rau and Wooten (1980), ambiente es un concepto que incluye todos los aspectos que rodean al ser humano y, lo afectan de manera individual o colectiva, por lo cual puede definirse como el complejo de factores físicos, biológicos, sociales, culturales, económicos y estéticos que afectan a los individuos y comunidades y que determinan su forma, carácter, relaciones y supervivencia sobre un espacio y tiempo.

### ***2.1.1. Gestión ambiental***

La gestión ambiental contempla de manera integrada ciertas interacciones entre el medio natural y humano con los proyectos de infraestructura, como vectores que introducen modificaciones significativas al ambiente. La identificación, evaluación, prevención, mitigación o compensación de estas modificaciones o impactos ambientales, constituyen el objeto de la gestión ambiental (Ángel., et al. 1997). Para este autor, el punto inicial de la gestión ambiental se encuentra en la conceptualización de un "proyecto de desarrollo" (acciones necesarias para la materialización de un "modelo de desarrollo"), entendido como un conjunto complejo de actividades y transformaciones planificadas para transformar el entorno natural y humano y que tal proceso implica la inversión de capital, tanto económico, cultural como tecnológico.

El mismo autor expresa que, el proceso de los estudios ambientales en un proyecto de desarrollo o infraestructura, obedece en primera instancia a la lógica de prevenir o evitar si es posible y si no mitigar, los impactos ambientales no deseables. En segundo lugar, de no ser posible lo anterior, se entraría en la lógica de compensar por daños o pérdidas inevitables que suelen traer consigo los proyectos de desarrollo que resultan de políticas nacionales y de los requerimientos del modelo de desarrollo imperante, y por último, responde a la lógica de potenciar vectores de desarrollo en beneficio de la región involucrada con el proyecto.

Precisa el mismo autor, que "es necesario reconocer que la gestión ambiental, seguramente no podrá manejar de manera apropiada la totalidad de impactos generados y por

tanto existirá una porción de estos que permanezcan sin atención. Esto conforma el "Impacto Ambiental Remanente", conceptualizado desde la economía como "externalidad"<sup>2</sup>, finalmente asumido por la sociedad en su conjunto, mediante la destinación de dineros públicos para su gestión o mediante la internalización directa de los costos, por parte de los afectados". (Ángel, 2000).

Según Guhl et al (2000), la gestión ambiental se define como el manejo participativo, de los aspectos ambientales en una región, por los diversos actores sociales, mediante el uso de la aplicación de instrumentos jurídicos, de planeación, tecnológicos, económicos, financieros y administrativos, para lograr el funcionamiento adecuado de los ecosistemas y el mejoramiento de la calidad de vida de la población dentro de un marco de sostenibilidad.

La idea central de la anterior definición consiste en el uso selectivo y combinado de todos los instrumentos con que cuentan los diversos actores, para adelantar las labores que conduzcan al cumplimiento de las metas de mejoramiento de la calidad ambiental, buscando una calidad de vida cada vez mejor para la población.

Se entiende pues, la gestión ambiental, como un proceso cíclico de mejoramiento continuo, en el que se va alcanzando gradualmente una mejor calidad ambiental, donde el

---

<sup>2</sup> Posada, 1997, presenta desde las ciencias económicas algunas diferencias referidas a la noción de externalidad así: mientras la economía neoclásica considera las externalidades como algo anormal que se puede resolver, corrigiendo las fallas del mercado o los errores del gobierno, la economía ecológica, por su parte, considera que son algo normal, inherentes a la producción y el consumo; como alternativas propone bajar el crecimiento económico, para minimizarlas.

centro del ciclo se forma con la comunicación, la participación y la cooperación, que responden al verdadero sentido de la gestión ambiental, como un compromiso y una responsabilidad colectiva, en la que diversos actores desempeñan papeles diferentes pero complementarios.

La Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE), afirma que las actividades humanas ejercen presión sobre el medio ambiente, modificando la calidad y la cantidad de los recursos naturales, además que, estos cambios alteran el estado o condición del ambiente y, que las respuestas humanas a ellos deben incluir un compromiso organizado que apunte a reducir, prevenir o mitigar cambios indeseables, lo cual parece acertado.

Durante las últimas tres décadas el concepto de Evaluación del Impacto Ambiental se ha mantenido relativamente inmutable, entendido como el proceso que evalúa y predice los efectos que pudiera generar una acción, llámese política, plan, programa o proyecto sobre el ambiente o la salud humana en lo económico, social, físico, biológico y estético, donde las conclusiones que arroja el estudio representan una herramienta para la toma de decisiones (Therivel, 1992; Wathern, 1994 y Gilpin, 1995).

La evaluación tiene, entonces, como propósito prevenir la degradación ambiental por medio de los aportes de mejor información a los encargados de la toma de decisiones sobre las consecuencias que pudieran ocasionar, al ambiente, acciones de desarrollo que no pueden prevenirse por sí mismas.

De acuerdo a lo anterior, una de las propuestas de esta investigación, es introducir a los análisis de gestión ambiental los elementos y variables que conduzcan a determinar efectos sean negativos o positivos debidos a la variabilidad natural del ambiente o ante un potencial cambio climático.

### ***2.1.2. Cambio climático***

El cambio climático, según la definición del Grupo de Expertos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC (2001), se refiere a cualquier cambio del clima<sup>3</sup> en el tiempo, bien sea natural o como resultado de actividades humanas. Consideran que esta definición difiere de la enunciada por la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC). Para el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam, 2000), este cambio puede determinar diferencias en los valores medios de un factor climático, es decir, su cambio se puede manifestar como un nuevo clima normal y por lo tanto, llevar a un ajuste en las actividades humanas.

Los procesos externos tales como la variación de la radiación solar, variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra como la excentricidad, precesión o inclinación (ciclos de Milankovitch), los movimientos de la corteza terrestre y la actividad, son factores que tienen gran importancia en el cambio climático, en escalas temporales de miles de años. Aspectos internos del sistema climático también pueden producir fluctuaciones de suficiente magnitud y

---

<sup>3</sup> De forma general clima se define o asocia con la condición promedio de muchos estados de tiempo, en lapso de meses, años, décadas, mientras que tiempo se define como la condición atmosférica presente o esperada en periodos de uno, dos o tres días (Landa, et al. 2008).

variabilidad a través de los procesos de retroalimentación de los componentes del sistema climático.

La variación solar más conocida es la de los ciclos de las manchas solares, de 11 años de duración; Heinrich Schwabe fue el primero que observó la variación cíclica del número de manchas solar entre 1826 y 1843. Según algunos estudios recientes, durante el último siglo, la temperatura media de la Tierra ha aumentado en aproximadamente  $0,6^{\circ}\text{C}$ , el calentamiento inducido por la variación solar es tan sólo de aproximadamente  $0,15^{\circ}\text{C}$  (25 por ciento) de esta cantidad (<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/130608d.html>).

La responsabilidad humana con el problema que representa el cambio climático es ineludible, situación que ha sido reconocida plenamente y ha movilizó a los países para encontrar soluciones que ataquen las causas del problema y mitiguen sus consecuencias. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005)

### ***2.1.3. Sensibilidad, capacidad de adaptación y vulnerabilidad al cambio climático.***

Se retoman algunas definiciones y conceptos dados por los Grupos de Trabajo I, II y III (GWI, GWII y GWIII) del panel de expertos intergubernamental para el cambio climático IPCC, en el tercer informe del 2001 y el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del 2007.

Se define *sensibilidad* como el grado de afectación perjudicial o benéfico de un sistema, dado por estímulos relacionados con el cambio del clima. Abarca todos los elementos del cambio climático, incluido el promedio de características y variabilidad del clima, la frecuencia y magnitud de casos extremos. El efecto puede ser directo (por ejemplo un cambio del rendimiento de cosechas en respuesta a un cambio del valor medio o de la variabilidad de la temperatura) o indirecto (como daños causados por un aumento de la frecuencia de inundaciones en la costa por razón de una subida del nivel del mar).

La habilidad de un sistema de ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para moderar daños posibles, potenciar oportunidades o enfrentar consecuencias nocivas es considerada *capacidad de adaptación*.

El *grado de susceptibilidad* o incapacidad de un sistema de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad y los extremos del clima, es considerado *vulnerabilidad* y estará en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio, la variación a la que el sistema está expuesto, de su sensibilidad y capacidad de adaptación.

#### **2.1.3.1. Sistemas humanos sensibles y/o vulnerables al cambio climático**

Son muchos los sistemas humanos sensibles al cambio climático, entre ellos se incluyen los recursos hídricos, agricultura, silvicultura, zonas costeras y sistemas marinos, asentamientos humanos, energía, industria, seguros y otros servicios financieros y de salud humana; la vulnerabilidad de estos sistemas dependerá del lugar geográfico, del tiempo y de

las condiciones sociales, económicas y ambientales regionales y/o locales (IPCC, 2001, Watson, et al., 1998).

De acuerdo con los diferentes modelos y otros estudios sobre el cambio climático, entre los posibles impactos negativos, se tiene:

- Reducción general del rendimiento de las cosechas en la mayoría de las regiones tropicales y subtropicales por aumentos previstos de la temperatura.
- Disminución general, con algunas variaciones, del rendimiento posible de las cosechas en la mayoría de las regiones de latitud media por aumentos del promedio anual de temperatura en unos pocos °C .
- Menor disponibilidad de agua para poblaciones en muchas regiones con escasez del recurso, particularmente en las regiones subtropicales.
- Aumento del número de personas expuestas a enfermedades transmitidas por vectores (paludismo) y en aguas pantanosas (cólera), y aumento de la mortalidad por la tensión del calor.
- Aumento extendido del riesgo de inundaciones para muchos asentamientos humanos a consecuencia de sucesos crecientes de precipitación fuerte y subida del nivel del mar.
- Aumento de la demanda de energía para acondicionamiento de locales o edificaciones debido a mayores temperaturas estivales.

Entre los posibles impactos beneficiosos se encuentran:

- Aumento del rendimiento de las cosechas en algunas regiones a latitudes medias por aumento de la temperatura en unos pocos °C.



- Aumento posible del suministro de maderas en el mundo, en bosques con una ordenación adecuada.
- Aumento de la disponibilidad de agua en poblaciones de algunas regiones con escasez.
- Menor mortalidad invernal en latitudes medias y altas.
- Demanda reducida de energía para calefacción debido a mayores temperaturas invernales.

En este sentido son esenciales los análisis de escenarios climáticos futuros, así como de vulnerabilidad de los diferentes sistemas y sectores, además de la elaboración de estrategias de adaptación. Gay (2000), analiza y presenta elementos fundamentales para la construcción de dichos escenarios futuros, estudios de vulnerabilidad sobre diferentes aspectos físicos, como la sequía meteorológica, recursos hídricos, ecosistemas forestales y zonas costeras; vulnerabilidad de algunos sectores productivos como la agricultura, energía e industria, y sobre los asentamientos humanos y la población. Otros estudios e investigaciones relevantes estrechamente relacionados con los anteriores aspectos, han sido adelantados y desarrollados por diferentes autores, (Gay et al, 1995; Gay et al, 1996; Gay et al, 2007; Conde et al, 1997; Conde y Eakin, 2003; Magaña et al, 1997).

### ***2.1.3.2. Efectos sobre los recursos hidrológicos e hídricos y su vulnerabilidad***

El efecto del cambio climático en el flujo de circulación y en la recarga de aguas subterráneas varía de una región a otra y de un escenario climático a otro, sobre todo en función de las proyecciones de cambio de las precipitaciones. La mayoría de los escenarios de

cambio climático indica que aumentará el flujo de circulación medio anual en altas latitudes y en Asia sudoriental y disminuirá en Asia central, en la zona limítrofe al Mediterráneo, en África meridional y en Australia.

Aproximadamente 1,700 millones de personas, una tercera parte de la población del mundo, viven actualmente en países sometidos a tensiones de escasez de agua (definido como el uso de más del 20% de su suministro renovable) y se prevé que para el 2025 la población sometida a dicha tensión será de 5 mil millones, en función del índice de la tasa de crecimiento poblacional; mientras que en otras regiones la magnitud y la frecuencia de las inundaciones podrían aumentar a consecuencia de una creciente ocurrencia de sucesos de precipitación fuerte que pueden generar a su vez aumentos de las escorrentías en la mayor parte de las zonas, así como, la recarga de aguas subterráneas en algunas llanuras con usos agrícolas convirtiéndose en factores negativos para muchos sectores y fines (IPCC, 2001).

Se estima que el 65% de la población mundial impactada por algún evento natural, ha sido por fenómenos hidrometeorológicos. Según informe de la Universidad de Lovaina, Bélgica, citada por OMM (2004), en el período 1993-2002, los extremos hidrometeorológicos afectaron el 87% de las personas impactadas por desastres. Un 52% de muertes reportadas en ese período se producen por sequías mientras que el 11% por inundaciones.

Trenberth et al. (2003) argumentan que el calentamiento global podría incrementar la intensidad de las precipitaciones y reducir su frecuencia, que el efecto sobre los recursos

hídricos podrían ser suficientes para iniciar conflictos entre usuarios, regiones y países, y que los cambios en procesos de escurrimiento superficial dependerán de los cambios de temperatura y precipitación, entre otras variables. Según Arnell, et al. (2001), Gay (2000) utilizando algunos modelos climáticos para simular el clima futuro bajo diferentes escenarios de emisiones, encuentran que todas las simulaciones indican un aumento en el promedio global de precipitación, pero al mismo tiempo señalan áreas con grandes disminuciones en el escurrimiento superficial, de donde concluye que el aumento de la precipitación claramente no se traduce en aumentos regionales en la disponibilidad de agua superficial y subterránea, lo cual se ha observado en Cuencas como: Cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, la del Río Pánuco y Río Balsas, en México, Gay (2000), Mendoza, et al (1997); en otros ríos de diferente parte del mundo como: Amazonas, Congo, El Nilo, Mackenzie, Yenissey, Ob, Yangtze, Amur, (Axel. K, et al., 2000)..

Se predice igualmente que la magnitud y la frecuencia de las crecidas aumenten en la mayoría de las regiones como el sur, este y sudeste de Asia, interior de Europa, occidente de América del Norte, grandes deltas de África (AR4-GWII del IPCC, 2007) y que los flujos bajos disminuyan en muchas otras. El aumento general en la magnitud y frecuencia de las crecidas es una consecuencia de un aumento general proyectado en la frecuencia de los sucesos de precipitaciones fuertes, aunque el efecto de un cambio determinado en las precipitaciones depende de las características de la cuenca. Los cambios en los flujos bajos están en función de los cambios en las precipitaciones y la evaporación, en general se proyecta que la evaporación aumentará, lo que puede dar lugar a flujos más bajos, aun cuando las precipitaciones aumenten o cambien poco.

Se considera además que el cambio en la utilización de los terrenos o usos del suelo puede agudizar los anteriores eventos; disminuyendo en muchas áreas y diferentes zonas geográficas el flujo de corrientes durante períodos de circulación baja estacional debido a una mayor evaporación; de otro lado los cambios de precipitación también pueden agudizar o desplazar los efectos de un aumento de la evaporación.

El impacto sobre los recursos hídricos no solo depende de los cambios en volumen, momento, calidad y recarga de los flujos de las corrientes, sino también de las características y presiones sobre el sistema, la forma en que evoluciona la ordenación del sistema y las adaptaciones al cambio climático que se apliquen. Es posible que los cambios no climáticos tengan un mayor impacto que los climáticos en los recursos hídricos; mayores presiones sobre el sistema aumentarán la vulnerabilidad al cambio climático, pero muchos cambios en la ordenación reducirán la vulnerabilidad. Los sistemas no sujetos a ordenación seguramente serán los más vulnerables al cambio climático (IPCC, 2001, UNFCCC, 2005).

De otro lado, es probable que haya una máxima vulnerabilidad en sistemas hídricos mal administrados, bajo tensión o cuya ordenación es deficiente e insostenible, debido a políticas que no estimulan el uso eficaz o la protección de la calidad del agua, además serían altamente vulnerables aquellas cuencas fluviales con una ordenación inadecuada, al no administrar el suministro variable de aguas y su demanda o a la inexistencia de orientación profesional idónea.

Los métodos de ordenación de los recursos hídricos, particularmente aquellos de ordenación integrada de los mismos, pueden ser aplicados para adaptarse a los efectos hidrológicos del cambio climático y a nuevas incertidumbres, con el fin de disminuir las vulnerabilidades. Actualmente, los enfoques referentes al suministro son más ampliamente utilizados que los referentes a la demanda (que alteran la exposición a la tensión); aunque estos últimos sean ahora objeto de una mayor atención; sin embargo, la capacidad de aplicar respuestas de ordenación eficaces está desequilibradamente distribuida por todo el mundo y es baja en muchos países con economías en transición y en desarrollo (IPCC, 2001).

El método del Manejo Integrado de Recursos Hídricos (IWRM, por sus siglas en inglés) es un enfoque sistemático de planificación y manejo que considera una serie de procesos y acciones de oferta y demanda e incorpora la participación de actores claves en procesos de decisión; además facilita el manejo adaptativo a través del monitoreo y la continua revisión de la situación de los recursos hídricos. (UNFCCC, 2006).

El WEAP 2.1. es una herramienta que permite realizar un efectivo IWRM, el cual integra una gama de procesos hidrológicos físicos con la administración de demandas e infraestructura instalada de manera continua y coherente; permite el análisis de escenarios múltiples, incluyendo escenarios climáticos alternativos y cambios antropogénicos causantes del estrés tales como las variaciones en el uso del suelo, los cambios en demandas municipales e industriales, las reglas operativas alternativas y los puntos de diversificación de los cambios. (UNFCCC, 2005).

### ***2.1.3.3. Vulnerabilidad de los asentamientos humanos, energía e industria***

De acuerdo con la extensa literatura y los datos cuantitativos, cada vez es más evidente la influencia del cambio climático sobre los asentamientos humanos en las siguientes tres direcciones:

1. Serán afectados los sectores económicos (sector primario) que prestan apoyo a los asentamientos por razón de los cambios de la productividad de los recursos o cambios de la demanda del mercado, en cuanto a los bienes y servicios producidos.

2. Pueden estar directamente afectados algunos aspectos de la infraestructura material (incluidos los sistemas de transmisión y distribución de energía), edificios, servicios urbanos (incluidos los sistemas de transporte), y determinadas industrias (tales como agroindustria, turismo, y construcción).

3. Las poblaciones pueden estar directamente afectadas a razón de condiciones meteorológicas extremas, cambios de la situación sanitaria, o migración (modificación de las tasas de muertes, lesiones o enfermedades, el estado de la salud puede mejorar como resultado de un menor estrés de frío, o empeorar como resultado de un mayor estrés de calor). Los problemas son en cierto modo distintos en los grandes centros de población, los asentamientos más pequeños (menos de 1 millón y los de tamaño mediano a pequeño) pueden en realidad ser más vulnerables, debido a la distribución de los recursos nacionales, los cuales se centran principalmente en los grandes asentamientos.

El cambio climático tiene el potencial para crear condiciones locales y regionales que comprenden déficit y excedentes de agua, algunas veces de carácter estacional en las mismas localizaciones geográficas. El riesgo directo, a consecuencia de dicho cambio, que más afecta los asentamientos humanos en gran parte del mundo son las inundaciones y movimientos de tierra, agudizados por el aumento previsto de la intensidad de las lluvias y en las zonas costeras, por la subida del nivel del mar. Están particularmente amenazados los asentamientos en las vertientes de los ríos y del mar, pero igualmente es posible la inundación urbana en aquellos sitios que poseen una capacidad inadecuada de los sistemas de gestión de alcantarillas, suministro de aguas y desechos; en tales áreas, son altamente vulnerables los barrios con ocupación ilegal de la tierra y otros asentamientos urbanos no planeados con elevada densidad poblacional, refugios deficientes, poco o ningún acceso a recursos tales como agua potable y servicios sanitarios públicos y escasa capacidad de adaptación.

Actualmente los asentamientos humanos sufren otros problemas de índole ambiental, que pueden agravarse con regímenes de temperaturas más elevadas y mayor precipitación, estos problemas están relacionados con los recursos de agua y energía, la infraestructura, tratamiento de desechos y transporte.

Es importante anotar que los asentamientos o poblaciones que cuentan con un elevado porcentaje de ingresos provenientes de industrias derivadas de recursos primarios sensibles al clima (agricultura, silvicultura, y pesquerías) son más vulnerables que los asentamientos más diversificados económicamente. De otro lado la infraestructura industrial, de transporte y comercial es en general vulnerable a los mismos peligros que la infraestructura de los asentamientos. Se prevé que la demanda de energía aumente en cuanto a la necesidad de

enfriar los edificios y disminuya en cuanto a calefacción, pero el efecto neto depende de los escenarios y del lugar. Algunos sistemas de producción y distribución de energía pueden sufrir impactos adversos que reducirían los suministros o la fiabilidad de los sistemas mientras que otros sistemas energéticos podrían beneficiarse.

En este aspecto, entre las posibles opciones de adaptación están la planificación de los asentamientos y de su infraestructura, el emplazamiento de instalaciones industriales, y la adopción de decisiones similares a largo plazo de forma que se reduzcan los efectos adversos de sucesos que son de una escasa probabilidad (aunque creciente), pero que conllevan grandes consecuencias (quizás están en aumento).

#### ***2.1.4. Vulnerabilidad regional***

Como se había mencionado en párrafos anteriores, la vulnerabilidad de los asentamientos humanos y de los sistemas naturales al cambio climático varía fundamentalmente según las regiones y según las poblaciones dentro de éstas, al presentar una exposición distinta a los estímulos del clima de acuerdo a su situación geográfica. Los sistemas naturales y sociales de las diversas regiones tienen múltiples características, recursos e instituciones, y están sometidos a una diversidad de presiones que dan lugar a diferencias de sensibilidad y de capacidad de adaptación; a partir de estas diferencias surgen inquietudes importantes que son distintas en cada una de las principales regiones del mundo, incluso dentro de una región, variarán los impactos, la capacidad de adaptación y la vulnerabilidad.



El Grupo de Trabajo II del IPCC (2007), refiere la capacidad de adaptación y la vulnerabilidad para la región de América Latina, igualmente expone algunas inquietudes al respecto, como las presentadas a continuación.

#### ***2.1.4.1. Vulnerabilidad y capacidad de adaptación en América Latina***

- La capacidad de adaptación de los sistemas humanos en Latinoamérica es escasa, particularmente respecto a fenómenos climáticos extremos, además la vulnerabilidad es elevada.
- Hacia la mitad del siglo, los aumentos de temperatura y la disminución de la humedad en los suelos darían lugar a una sustitución gradual de los bosques tropicales a sabanas en el este de la Amazonia. La vegetación semiárida sería progresivamente sustituida por vegetación de tierras áridas.
- Podrían producirse pérdidas importantes de biodiversidad debido a la extinción de numerosas especies en áreas tropicales de América Latina.
- Podría disminuir la productividad de ciertos cultivos importantes, así como la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria. En conjunto, aumentará el número de personas amenazadas por hambre.
- Los cambios en los patrones de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarán seriamente la disponibilidad de agua para el consumo humano, la agricultura y para la generación de energía.

### ***2.1.5. Métodos e instrumentos utilizados en la evaluación de impactos del cambio climático.***

La evaluación de los impactos del cambio climático, adaptaciones y vulnerabilidad está basada en la convergencia de una amplia gama de disciplinas de las ciencias físicas, biológicas y sociales, por lo tanto, comprende una enorme variedad de métodos e instrumentos. Se han hecho grandes esfuerzos y tomado algunas medidas para ampliar la “caja de herramientas” que contribuyan de forma más eficaz al tratamiento o introducción de las dimensiones humanas del clima, en cuanto son causa del cambio global y sufren las consecuencias del mismo, además para analizar de forma integral las cuestiones intersectoriales relacionadas con la vulnerabilidad, la adaptación y la adopción de decisiones; en particular, en un número cada vez mayor de estudios se han comenzado a aplicar métodos e instrumentos para la determinación del costo y la valoración de los efectos, el tratamiento de las incertidumbres, la integración de los efectos entre los sectores y las regiones y la aplicación de marcos analíticos a las decisiones, a fin de evaluar la capacidad de adaptación; en general, estos valiosos avances metodológicos están alentando análisis que establecen bases más sólidas para comprender como se podrían tomar decisiones relativas a la adaptación del futuro cambio climático.

#### ***2.1.5.1. Anticipación a los efectos de futuros cambios climáticos***

En los estudios por países y en las evaluaciones regionales realizadas en todos los continentes se han ensayado modelos e instrumentos en una variedad de contextos (incluyendo la adaptación en algunos de ellos). Los modelos de impacto de primer orden se han vinculado a modelos de sistemas mundiales.

Pese a todos los esfuerzos realizados, quedan algunos vacíos metodológicos relativos a escalas, datos, validación e integración de la adaptación y las dimensiones humanas del cambio climático. Los procedimientos para evaluar la vulnerabilidad local y las estrategias de adaptación a largo plazo requieren evaluaciones de alta resolución, metodologías para vincular escalas (por lo general se carece de validación a diferentes escalas) y modelación dinámica en que se utilicen conjuntos de datos nuevos y pertinentes; es necesario además la integración regional entre los sectores para colocar la vulnerabilidad en el contexto del desarrollo local y regional.

Aunque los métodos y los instrumentos para evaluar la vulnerabilidad de sucesos extremos han mejorado, están aun limitados por la baja confianza de los escenarios del cambio climático y la sensibilidad de los modelos de cambio a importantes anomalías climáticas. Es igualmente de gran relevancia comprender, analizar e integrar efectos económicos de un orden más alto y otras dimensiones humanas, es imprescindible entonces, mejorar los métodos para hacer posible la participación de los interesados en las evaluaciones.

#### ***2.1.5.2. Evaluación integrada***

La evaluación integrada es un proceso de análisis e interpretación interdisciplinario para investigar y comprender las relaciones de causalidad dentro de sistemas complejos y sus relaciones, los criterios metodológicos que utiliza dicha evaluación incluyen modelación computacional, análisis de escenarios, simulación al azar y evaluación integrada participativa,

además incluye evaluaciones cualitativas basadas en la experiencia, así como los conocimientos existentes.

Los avances logrados a la fecha, respecto a la modelación integrada, se centran principalmente en la mitigación del impacto a escala mundial o regional y solo en forma secundaria al análisis integral de las relaciones de impactos, vulnerabilidad y adaptación, por lo tanto hay que insistir en el desarrollo de métodos para evaluar la vulnerabilidad, especialmente a escalas nacional y subnacional, dado que es allí donde se sienten y perciben los impactos del cambio climático y se aplican las respuestas; además es preciso desarrollar métodos para incluir la adaptación y la capacidad de adaptación en forma explícita en aplicaciones específicas.

### ***2.1.6. Escenarios de cambio y su función***

Se describe brevemente algunos escenarios de cambio futuro de acuerdo al GWIII del IPCC 2001.

Un escenario es una descripción coherente e internamente consistente de un posible estado futuro del mundo. Por lo general son indispensables en las evaluaciones del impacto del cambio climático, la adaptación y la vulnerabilidad para ofrecer diferentes alternativas, elementos y herramientas de manejo de las condiciones futuras que se consideren puedan influir en un sistema o alguna actividad específica. La mayoría de las evaluaciones de los

impactos de un futuro cambio climático se basan en los resultados de modelos cuantitativos que tienen como insumos escenarios climáticos y no climáticos.

#### ***2.1.6.1. Escenarios socioeconómicos, de uso del suelo y ambientales***

Describen futuros cambios socioeconómicos, de uso del suelo y ambientales y son importantes para caracterizar la sensibilidad de los sistemas al cambio climático, su vulnerabilidad y su capacidad de adaptación.

***Escenarios socioeconómicos:*** Se han utilizado extensamente para proyectar las emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI); en la mayoría de estos escenarios se identifican diferentes dimensiones, elementos o variables de análisis, como la población, la actividad económica, estructura de gobierno, valores sociales, pautas del cambio tecnológico, entre otras, dichos escenarios permiten establecer y relacionar la vulnerabilidad socioeconómica de referencia, anterior al cambio climático; determinar los impactos del cambio climático y evaluar la vulnerabilidad después de la adaptación.

***Escenarios de cambio en el uso del suelo y la cobertura vegetal:*** El cambio en el uso del suelo y la cobertura vegetal envuelve varios procesos y elementos que son fundamentales para la estimación del cambio climático y sus impactos; en primer lugar, influye en los flujos de carbono y las emisiones de GEI, que alteran directamente la composición atmosférica y las

propiedades de “*forzamiento radiativo*”<sup>4</sup>; segundo, modifica las características de la superficie terrestre e indirectamente los procesos climáticos; tercero, la modificación y conversión de la cobertura vegetal pueden alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático. La mayoría de estos escenarios no tratan específicamente aspectos de cambio climático, sino que centran su atención en otras cuestiones, como: la seguridad alimentaria y el ciclo del carbono.

***Escenarios ambientales:*** Se refieren a cambios en los factores ambientales distintos del clima que se producirán en el futuro independientemente del cambio climático, debido a que estos factores pueden cumplir funciones importantes en la modificación de los impactos del potencial cambio climático, los escenarios deben caracterizar las posibles condiciones ambientales futuras, como la composición atmosférica (dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ozono troposférico, compuestos de acidificación, radiación ultravioleta), la disponibilidad de agua, uso y calidad, contaminación marina, entre otros. Aparte de los efectos directos del enriquecimiento del CO<sub>2</sub>, en evaluaciones anteriores pocas veces se han considerado cambios de los factores ambientales junto con los cambios climáticos, aunque su integración e interpretación está aumentando con la aparición de los métodos de evaluación integrados.

---

<sup>4</sup> El IPCC, 2001; lo define como: “Cambio en la irradiancia vertical neta (expresada en watts por metro cuadrado: W/m<sup>2</sup>) en la tropopausa, a raíz de un cambio interno o de un cambio en el forzamiento externo del sistema climático, como, por ejemplo, un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol. El forzamiento radiativo se calcula generalmente después de dejar un margen para que las temperaturas de la estratosfera se reajusten a un estado de equilibrio radiativo, pero manteniendo constantes todas las propiedades troposféricas en sus valores no perturbados. El forzamiento radiativo se llama instantáneo si no se registran cambios en la temperatura estratosférica”.

El forzamiento radiativo por dióxido de carbono aumentó un 20% de 1995 al 2005, el cual es el mayor cambio para cualquier decenio al menos en los últimos 200 Años (IPCC, 2007).

### ***2.1.6.2. Escenarios climáticos***

Las evaluaciones de impactos han empleado tres tipos de escenarios climáticos: escenarios incrementales, escenarios analógicos y escenarios del clima basados en modelos. Los escenarios incrementales son simples ajustes del clima de referencia con relación a futuros cambios previstos que pueden ofrecer una asistencia valiosa para ensayar la sensibilidad del sistema al clima, pero pueden no ser meteorológicamente realistas; la representación analógica de un clima que ha cambiado a partir de registros anteriores o de otras regiones puede ser difícil de identificar y casi no se aplica, igualmente es restringido por la extrapolación de datos.

Los escenarios más comunes emplean resultados de modelos de circulación general (MCG) y se construyen ajustando un clima de referencia (normalmente basado en observaciones regionales del clima durante un período de referencia), en función del cambio absoluto o proporcional entre los climas simulados presentes y futuros. La gran mayoría de los escenarios representan cambios en el clima medio; algunos escenarios recientes, han incorporado cambios en la variabilidad y en los sucesos climáticos extremos que pueden tener impactos en algunos sistemas.

Los escenarios y análisis a nivel regional se obtienen a partir de los datos de salida de los MCG utilizando tres métodos principales: interpolación sencilla, reducción estadística de la escala y modelación dinámica de alta resolución; el método sencillo, que reproduce la pauta de cambio del MCG, es el que más se aplica en la elaboración de escenarios. Por otro lado, los

criterios estadísticos y de modelación pueden representar cambios del clima local que son diferentes de las estimaciones en los MCG, en este sentido es indispensable desarrollar más investigaciones para determinar el valor agregado que los escenarios regionales dan a los estudios del impacto.

### **2.1.6.3. Escenarios del siglo XXI**

Los nuevos escenarios examinan el período de 1990 a 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos (población mundial, concentración de ella, producto interno bruto, entre otros); también se han calculado sus consecuencias para otros aspectos del cambio mundial. Resumiendo algunas de estas repercusiones para 2050 y 2100 se encuentra: concentraciones medias de ozono a nivel del suelo sobre los continentes industrializados del hemisferio norte aumentarán en julio de unas 40 ppm en el año 2000 a más de 70 ppm en 2100; en comparación, la norma de aire limpio está por debajo de 80 ppm, además los niveles pico del ozono en sucesos de *smog* local puede ser muchas veces más alto; las estimaciones del CO<sub>2</sub><sup>5</sup> van desde 478 ppm a 1,099 ppm para 2100, dada la gama de emisiones e incertidumbres sobre el ciclo del carbono reportada en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisión (IE-EE) del IPCC (2001). Esta gama de supuesto forzamiento radiativo da lugar a un calentamiento mundial estimado entre 1.4°C a 1.8°C para el periodo analizado, suponiendo un intervalo de sensibilidades climáticas; el intervalo de la subida del nivel del mar en el mundo se estima entre 9 a 88 cm para el año 2100, teniendo en cuenta el anterior intervalo de cambios en temperatura y el intervalo de sensibilidades del deshielo.

---

<sup>5</sup> La concentración atmosférica mundial de dióxido de carbono ha aumentado de un valor aproximado de 280 ppm en la era pre-industrial a 379 ppm en 2005 (IPCC, 2007).



En el último informe entregado por el IPCC (2007) se concluye que el dióxido de carbono es el gas de efecto de invernadero más importante de origen antropogénico, igualmente se determina que la tasa de aumento de la concentración del dióxido de carbono fue mayor durante los últimos 10 años (1995-2005 en promedio: 1.9 ppm al año), que lo que ha sido desde el inicio de las mediciones atmosféricas directas (1960-2005 en promedio: 1.4 ppm por año).

En términos de cambios medios en el clima regional, los MCG suponiendo los nuevos escenarios de emisiones del IE-EE, muestran que las tasas de calentamiento probablemente serán mayores que la media mundial sobre la mayor parte de las zonas terrestres y serán más pronunciadas a latitudes altas en invierno; a medida que avanza el calentamiento, la cubierta de nieve del hemisferio norte y la extensión de hielo marino se reducirán, mientras que en el Atlántico norte y en las regiones oceánicas meridionales circumpolares, así como en Asia meridional y sudoriental y en la parte meridional de América del Sur posiblemente el calentamiento será inferior a la media mundial en los meses de junio y agosto; igualmente a nivel mundial, aumentarán el vapor de agua y las precipitaciones medias, a niveles regionales en cambio, se prevé que las precipitaciones de diciembre a febrero aumentarán sobre los extratropicos septentrionales, la Antártida y el África tropical. Además es importante anotar que los modelos concuerdan en predecir la disminución de las precipitaciones en América Central y en que habrá poco cambio en el Asia sudoriental; se proyecta igualmente un aumento de las precipitaciones (junio a agosto) en las latitudes septentrionales altas, la Antártida y el Asia meridional y una disminución en Australia, África meridional y la región del Mediterráneo (GWII del IPCC, 2001).

### ***2.1.7. América Latina y variabilidad climática***

Son muchas las pruebas de la variabilidad climática en un amplio rango de escalas temporales en toda América Latina. Desde períodos estacionales como de largo plazo, en esta región la variabilidad en el clima normalmente tiene que ver con fenómenos que ya han producido impactos con importantes consecuencias socioeconómicas y ambientales, que se verían acentuadas por el calentamiento mundial, sus cambios meteorológicos y climáticos conexos.

El fenómeno del Niño-Oscilación Austral (ENOA) es la causa principal de la variabilidad climática a escala interanual en América Latina, con impactos que varían en todo el continente. Por ejemplo, influye en las condiciones de sequía del noreste del Brasil, la región Amazónica septentrional, el altiplano Peruano-Boliviano y la costa del Pacífico de América Central; se considera que algunas de las sequías más severas que se han producido en México en los últimos decenios han tenido lugar durante los años de El Niño, por el contrario en Brasil meridional y en noroeste del Perú han mostrado condiciones no normales de humedad; mientras que La Niña es la causa de fuertes precipitaciones y crecidas en Colombia y de sequía en el Brasil meridional. Si aumentaran El Niño o La Niña, América Latina estaría expuesta a estas condiciones con más frecuencia.

De acuerdo a las diferentes subregiones de América Latina, las variaciones en las precipitaciones tienen diferentes e importantes efectos en las escorrentías y los flujos de las corrientes de agua, que se ven agudizados simultáneamente por el derretimiento de los

glaciares y la nieve. De otro lado la temperatura también varía entre las subregiones, aunque estas variaciones podrían depender del origen y la calidad de la fuente de los datos y de los períodos registrados que se han utilizado en los estudios y análisis, algunas de estas variaciones podrían atribuirse a una condición del cambio climático.

Frecuentemente en algunas subregiones se producen eventos extremos que históricamente han producido desastres; los ciclones tropicales, fuertes lluvias, crecidas y deslizamientos de tierras son muy comunes en América Central y México meridional; en el Noroeste de América del Sur y el nordeste del Brasil, muchos de los sucesos extremos guardan una estrecha relación con El Niño.

#### ***2.1.7.1. Cambio climático y recursos hídricos***

Se espera que el cambio climático intensifique el estrés hídrico actualmente padecido, debido al crecimiento de la población, al cambio económico y de los usos del suelo. A escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo desempeñan un papel crucial con respecto a la disponibilidad de agua dulce. Según las proyecciones, las pérdidas de masa generalizadas de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve de los últimos decenios se acelerarían durante el siglo XXI, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico (GWII del IPCC, 2007).

Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen cambios de la escorrentía y de la disponibilidad de agua. La escorrentía aumentaría entre un 10% y un 40% de aquí a

mediados de siglo en latitudes superiores y en ciertas áreas tropicales pluviales, y disminuiría entre un 10% y un 30% en ciertas regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a unas tasas de evapotranspiración más altas. Hay también un grado de confianza alto en que numerosas áreas semiáridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil) padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión, y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, salud, suministro hídrico, producción de energía. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto de los cambios climáticos. (GTI y GTII del IPCC, 2007).

Los impactos negativos del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce contrarrestan con creces sus efectos beneficiosos. En las extensiones en que disminuya la escorrentía podría disminuir el valor de los servicios proporcionados por los recursos hídricos. En ciertas áreas, los impactos beneficiosos de una mayor escorrentía anual estarían probablemente atenuados por los efectos negativos de una mayor variabilidad de las precipitaciones y de una alteración estacional de la escorrentía sobre el abastecimiento y calidad del agua y por un mayor riesgo de crecidas (GWII del IPCC, 2007).

Las diferentes investigaciones indican que aumentarán apreciablemente las precipitaciones de lluvia intensas en numerosas regiones, en algunas de las cuales disminuirán los valores medios de precipitación. El mayor riesgo de crecidas generaría problemas desde el

punto de vista de la sociedad, de la infraestructura física y de la calidad del agua. Es probable que hasta un 20% de la población mundial llegue a habitar en áreas en que las crecidas posiblemente aumenten de la fecha a la década de los 80s. El aumento de las temperaturas igualmente afectaría las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, afectando numerosas especies y la composición de los ecosistemas relacionados. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea. (GWI y GWII del IPCC, 2007).

De otro lado, se sabe que los sucesos extremos tienden a incrementar las tasas de mortalidad y morbilidad (lesiones, enfermedades infecciosas, problemas sociales y daños a la infraestructura sanitaria), como se pudo observar con el huracán Mitch en América Central en 1998, las fuertes lluvias en México y Venezuela en 1999, en Chile y Argentina en 2000, Colombia en 2004, huracán Katrina en Nueva Orleans en 2005, huracán Stan y Wilma en Sureste de México, Centro América y Sur de la Florida 2005, estos últimos considerados de los más fuertes y devastadores del siglo.

Las decisiones, actividades y programas de desarrollo juegan un papel importante en la modificación de la capacidad de adaptación de comunidades y regiones, sin embargo por lo general no tienen en cuenta los riesgos de la variabilidad y el cambio climático, la inclusión de los riesgos climáticos en el diseño y la ejecución de iniciativas de desarrollo es necesaria para reducir la vulnerabilidad y aumentar la sostenibilidad.

### ***2.1.8. Necesidades de información***

Existen aún considerables vacíos sobre exposición, sensibilidad, adaptabilidad y vulnerabilidad de los sistemas físicos, ecológicos y sociales al cambio climático, los avances en estas esferas son relevantes para aumentar la comprensión de las posibles consecuencias del cambio climático para la sociedad y el mundo natural, así como para apoyar los análisis, interpretación y discusión de las posibles respuestas.

***Exposición.*** Es necesario avanzar en los métodos para proyectar exposiciones a los estímulos climáticos y otras tensiones no climáticas a escalas espaciales más precisas, incluyendo las diferencias regionales y los estímulos a los que probablemente tengan que adaptarse los sistemas.

***Sensibilidad.*** La sensibilidad a los estímulos climáticos todavía no está suficientemente cuantificada para muchos sistemas naturales y humanos, es necesario desarrollar y mejorar modelos dinámicos, basados en los procesos de los sistemas naturales, sociales y económicos.

***Adaptabilidad.*** Es importante mejorar la aplicación de las experiencias de adaptación al cambio climático respecto a la variabilidad climática y utilizar esta información para elaborar estimaciones de base empírica de la eficacia y los costos de la adaptación, así como desarrollar modelos de predicción del comportamiento de adaptación que tengan en cuenta la adopción de decisiones en situaciones de incertidumbre

***Vulnerabilidad.*** Se necesitan más trabajos para integrar información sobre exposiciones, sensibilidad y adaptabilidad a fin de proporcionar información más detallada y cuantitativa sobre los posibles impactos del cambio climático y el grado de vulnerabilidad relativo de diferentes regiones, naciones y grupos socioeconómicos. Para avanzar habrá que desarrollar y perfeccionar mediciones o índices múltiples de vulnerabilidad.

***Incertidumbre.*** Es preciso depurar y aplicar métodos para tratar las incertidumbres, particularmente con respecto al suministro de información científica para la adopción de decisiones; mejorar la forma de expresar la probabilidad, la confianza y el intervalo de incertidumbre de las estimaciones de los resultados y determinar cómo se integran esas estimaciones en intervalos de incertidumbre más amplios.

Información detallada de los anteriores aspectos se pueden consultar en los informes del IPCC (2001, 2007)

#### ***2.1.9. Simulación del sistema climático y sus cambios***

De acuerdo con el GWI del IPCC (2001, 2007), un modelo climático es una representación matemática simplificada del sistema climático de la Tierra y la capacidad de éste para simular las respuestas a cambios e interacciones de sus componentes, depende en gran medida del grado de comprensión de los procesos físicos, geofísicos, químicos y biológicos que rigen dicho sistema. Algunos aspectos importantes respecto a los modelos se presentan a continuación.

El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de parametrizaciones empíricas utilizadas (AR4-GWI del IPCC, 2007).

#### ***2.1.9.1. Modelos climáticos, ¿Cómo se construyen y cómo se aplican?***

Generalmente se basan en leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven utilizando una rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo, con el propósito de simular el clima y sus cambios. Los principales componentes del sistema climático son la atmósfera, océanos, superficie terrestre, criosfera y la biosfera, además de sus interacciones.

Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de Circulación General Atmósfera–Océano (MCGAO); en el modelo se resuelven ecuaciones que describen la evolución a gran escala del impulso, el calor y la humedad; actualmente, la resolución de un modelo atmosférico típico es de aproximadamente 250 km en línea horizontal y alrededor de 1 km en línea vertical por encima de la capa límite, mientras que la resolución de un modelo oceánico corriente oscila entre 200 y 400 m en línea vertical, con una resolución horizontal entre 125 y 250 km. Se está evolucionando hacia modelos más complejos que incorporan



interacciones químicas y biológicas. Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operacionales, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (AR4-GWI del IPCC, 2007).

Para realizar proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima, en los últimos años los modelos se han perfeccionado gracias al desarrollo de las computadoras y paulatinamente se han venido integrando las diferentes componentes principales: atmósfera, superficie terrestre, océanos y el hielo marino y continental.

Algunos modelos corrigen los errores y los desequilibrios de los flujos en la superficie mediante “ajustes de flujo”, que son sistemáticos, determinados empíricamente en la interfaz atmósfera-océano y se mantienen constantes en el tiempo para aproximar el clima simulado al estado observado. Estudios recientes han diseñado estrategias para realizar experimentos climáticos que eliminan gran parte de los efectos que presentan algunos errores en los resultados. Generalmente se realiza una primera “pasada o corrida de control” de la simulación climática, seguidamente se ejecuta la simulación del experimento de cambio climático, por ejemplo con un aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico y por último, se toma la diferencia o se hace la comparación para obtener una estimación del cambio sufrido a causa de la perturbación climática; ésta técnica elimina la mayor parte de los efectos de cualquier ajuste artificial en el modelo, así como los errores sistemáticos que son comunes a ambas formas de ejecución del

modelo, sin embargo, la comparación de resultados provenientes de diferentes modelos demuestra que hay cierta clase de errores que siguen influyendo en los resultados.

Para realizar pronósticos fiables, teniendo en cuenta tanto las incertidumbres en las condiciones iniciales como las originadas en los modelos, es conveniente repetir la predicción muchas veces a partir de distintos estados de perturbaciones iniciales y con diversos modelos mundiales, el conjunto de predicciones son la base de los pronósticos de probabilidad del estado del tiempo (IPCC, 2001).

#### ***2.1.9.2. Técnicas de regionalización***

Las técnicas utilizadas para aumentar el grado de detalle a nivel regional-local han mejorado considerablemente y se están aplicando a un nivel más general; estas técnicas pueden clasificarse en tres categorías: MCGAO de resolución alta y variable, modelos climáticos regionales (MCR) (o de una zona limitada) y métodos empíricos-estadísticos y estadísticos-dinámicos. Se considera que estas técnicas tienen sus ventajas y desventajas y que su uso a escala continental depende en gran medida de las necesidades particulares de aplicación (GWI del IPCC 2001, 2007).

Los MCGAO, de baja resolución, regularmente simulan bien las características de la circulación atmosférica general; a escala regional, los modelos muestran desviaciones medias que varían enormemente de una región a otra y de un modelo a otro, así, las desviaciones de los valores medios de la temperatura estacional a nivel subcontinental son normalmente de  $\pm$

4°C y las desviaciones de las precipitaciones están entre - 40% y + 80% (GWI del IPCC, 2001).

Los avances de los modelos de circulación general de la atmósfera (MCGA) de alta y variable resolución muestran en general que la dinámica y las corrientes a gran escala representadas en ellos, mejoran a medida que aumenta la resolución. Sin embargo, en algunos casos, los errores sistemáticos son más frecuentes y relevantes que en los modelos de resolución más baja (GWI del IPCC, 2001).

Los modelos de circulación regionales MCR han mejorado de manera coherente el grado de detalle espacial del clima simulado, con relación a MCGA; los MCR, que se basan en las condiciones de contorno observadas, muestran desviaciones de las temperaturas cuyo promedio por zona (escalas regionales de 105 a 106 km<sup>2</sup>) es generalmente menor de 2°C, mientras que las desviaciones de las precipitaciones son inferiores al 50%. Las investigaciones sobre regionalización indican que a escalas más finas, la magnitud y/o el signo de los cambios pueden ser muy diferentes de los valores medios que se registran en zonas más extensas (GWI del IPCC, 2001, 2007).

## **2.2. MÉTODO**

### ***2.2.1. Situación geográfica de Colombia.***

Colombia se encuentra ubicada entre los 12° 30' 40" de latitud norte en Punta Gallinas (Guajira) y, 4° 13' 30" de latitud sur en las bocas de la quebrada San Antonio (extremo del Trapecio Amazónico). Con referencia al meridiano de Greenwich se ubica entre los 66° 50' 54" de longitud oeste (extremo de la isla de San José en el río Negro o Guainia) y los 79° 01' 23" de longitud oeste (en Cabo Manglares).

De acuerdo con la situación geográfica, Colombia se encuentra en la zona tórrida o de bajas latitudes en los 2 hemisferios, atravesada por el ecuador. En consecuencia, su clima es tropical, no presenta las 4 estaciones térmicas, tan sólo se suceden épocas de veranos prolongados y otras de invierno en que llueve con mayor frecuencia; los días y noches son casi de igual duración. (Comisión Colombiana del Océano - CCO. 2003).

Por su ubicación en América del Sur (extremo noroccidental) comparte fronteras con Panamá, Venezuela, Brasil, Perú y Ecuador. Tiene una extensión de 1,141,748 km<sup>2</sup> siendo el cuarto país más grande de Suramérica, después de Brasil, Argentina y Perú; posee 2,900 kilómetros de costa, de los cuales 1,600 están sobre el Mar Caribe y 1,300 en el Océano Pacífico.

La Nación es cruzada de sur a norte por la gran Cordillera de los Andes, que se divide en tres cadenas: Occidental, Central y Oriental, esta cadena montañosa marca las cuatro principales regiones del país que son: la zona andina o montañosa, la región Caribe (norte), la región del Pacífico (oeste) y la región de Orinoquia-Amazonia hacia el este y sur del país.

### **2.2.2. *Clima***

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2001), el clima Colombiano es muy variado, tanto a lo largo de su territorio como a través del tiempo. Esta diversidad climática está determinada en gran medida por la ubicación geográfica y por las características fisiográficas del territorio colombiano; la diversidad climática colombiana es un recurso importante del país, y las variaciones del clima juegan un papel importante en las diferentes formas de actividad humana.

Se presentan algunas variables meteorológicas-hidrológicas que se tuvieron en cuenta para el análisis oferta-demanda del recurso hídrico, realizado por el IDEAM en el 2001.

#### **2.2.2.1. *Radiación solar***

La principal fuente de energía para casi todos los procesos atmosféricos, la constituye la energía radiada por el Sol hacia la Tierra en el rango de la longitud de onda corta entre 0,1 mm a 30 mm, las unidades para medir la radiación son watt/m<sup>2</sup>.

La radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera presenta en su camino una serie de transformaciones producidas por procesos de atenuación; la radiación que llega del Sol a la superficie de la Tierra se llama radiación directa, la parte que es difundida por las partículas atmosféricas y nubes llega a la Tierra en forma de radiación difusa; la suma de ambas se denomina radiación global.

En cuanto a la magnitud y distribución de la radiación global en el territorio Colombiano se encuentra lo siguiente:

- La península de La Guajira (Región Caribe) es la de mayor radiación solar en el país y sus valores máximos se presentan en el mes de julio, con promedios superiores a  $7.6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ , este valor desciende gradualmente hasta diciembre, mes en que se presenta el valor mínimo de  $6.2 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ .
- El mismo comportamiento lo siguen la parte media del valle geográfico del río Cauca, el valle del río Magdalena hasta la costa Atlántica y la zona de Cúcuta. Los valores extremos se presentan en julio y diciembre con reportes de  $6.4$  y  $5.2 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ , respectivamente.
- En la Amazonia, contrario a las regiones anteriores, el valor máximo se presenta en octubre con  $3.8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ . En la región Andina sobresale el altiplano Cundiboyacense con valores máximos en febrero en los niveles de  $5.6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ , que luego descienden gradualmente hasta junio, mes de mínimos con  $4.9 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ ; nuevamente se incrementan poco a poco hasta septiembre, para descender hasta noviembre. El resto de la región Andina presenta el mismo comportamiento durante el

año con menores valores y extremos de 4.6 y 3.7  $\text{kwh/m}^2\cdot\text{día}$  en los meses de febrero y junio respectivamente.

- Los valores de radiación más bajos se encuentran en la costa del Pacífico y el piedemonte llanero (área circundante de Villavicencio), con promedios menores de 3.5  $\text{kwh/m}^2\cdot\text{día}$ ; durante el año presentan poca variabilidad, siendo los meses de marzo y abril los de mayor radiación, mientras que noviembre y diciembre se caracterizan por ser los meses de menor radiación, con valores extremos de 3.7 y 3.3  $\text{kwh/m}^2\cdot\text{día}$ . (Mapa IA, ANEXO I).

#### ***2.2.2.2. Temperatura del aire***

El régimen de la temperatura del aire en el país está determinado por su situación geográfica y las particularidades fisiográficas del territorio; el primer factor influye sobre la amplitud anual de la temperatura del aire, mientras que el segundo determina en gran parte su variabilidad espacial, así:

- En la región Andina, el régimen de la temperatura del aire está determinada por la presencia de los llamados pisos térmicos, consistentes en la disminución de la temperatura media del aire a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar (en promedio, el valor vertical de la temperatura con la altura disminuye 0.625 °C cada 100 m, de esta forma, se tendría una temperatura de 16.9 °C a 2,000 m y 10.7 °C a 3,000 m; el nivel de la isoterma de 0 °C se presenta aproximadamente a 4,700 msnm.), en esta región se presentan núcleos o franjas bien marcadas de valores relativamente altos o bajos de temperatura. Los valles de los principales ríos, como el Magdalena, el Cauca, el Patía y el Sogamoso, registran altos valores, mientras que los altiplanos

Cundiboyacense y Nariñense, la zona montañosa del centro de Antioquia, así como las áreas aledañas a nevados y las regiones de páramo presentan los valores mínimos.

- En la costa Atlántica la temperatura media fluctúa entre 24 °C y 28 °C, al igual que en Córdoba, parte central y norte de Sucre; en La Guajira, zona sur y oriente del Atlántico, al suroriente de Sucre, en Magdalena (exceptuando la Sierra Nevada de Santa Marta) y valle del río Cesar, las temperaturas varían entre 28 °C y 30 °C.
- En la Orinoquia y la región Amazónica no existen accidentes geográficos notables, siendo bastante homogéneo su relieve, conformado principalmente por extensas sabanas cultivadas de pastos; en estas regiones la distribución de la temperatura media del aire es muy uniforme, con valores entre 24 °C y 28 °C.
- Entre la cordillera Occidental y el océano Pacífico se sitúa la región Pacífica, con temperaturas medias anuales entre 24 °C y 28 °C. Esta área cubre gran parte de los departamentos de Chocó, Valle, Cauca y Nariño y es bañada por importantes ríos, como el Mira, la parte baja del Patía, el San Juan y el Atrato. (Mapa IB, **Anexo I**)

### **2.2.2.3. Precipitación**

La posición geográfica de Colombia en la zona ecuatorial la sitúa bajo la influencia de los alisios del noreste y sureste. Estas corrientes de aire cálido y húmedo provenientes de latitudes subtropicales de los dos hemisferios, confluyen en una franja denominada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual favorece el desarrollo de nubosidad y de lluvias.



La ZCIT se mueve latitudinalmente siguiendo el desplazamiento aparente del Sol con respecto a la Tierra, con un retraso aproximado de dos meses y pasa sobre el territorio Colombiano en dos ocasiones cada año. El desplazamiento de la ZCIT y la acción de factores físico-geográficos regionales, como la orografía, determinan el régimen de lluvias en las regiones de Colombia.

La ZCIT, en Colombia, alcanza entre enero y febrero su posición extrema meridional en los 2° de latitud norte, mientras que en diciembre está un poco más al norte. Durante los eventos de El Niño puede alcanzar los 5° de latitud sur en el océano Pacífico, en tanto que en la parte continental aparece fraccionada e independiente de éste y se ubica entre los 5° y 10° de latitud sur; entre marzo y mayo, el segmento del Pacífico de la ZCIT se mueve hacia el norte, y su posición cerca de la costa está entre 2° y 7° de latitud norte; la rama continental se conecta entre marzo y abril con el segmento del océano Atlántico, formando un solo sistema que se ubica entre los 5° de latitud sur y 1° de latitud norte al oriente del país; estos dos segmentos se unen a través de conglomerados convectivos no muy bien organizados sobre la región Andina.

Entre junio y agosto, al inicio del periodo, el segmento del Pacífico se localiza en los 8° de latitud norte y al final del periodo en los 10° de latitud norte, penetrando a la región Caribe; el segmento continental presenta una inclinación suroeste-noreste sobre el oriente del territorio Colombiano, desplazándose hacia el norte a los 8° de latitud (Ideam, 2000).

#### ***2.2.2.4. Patrón general de lluvias***

La Alta Guajira presenta la menor precipitación anual, con totales menores o iguales a 500 mm, mientras que la región del Pacífico registra los mayores valores alcanzando anualmente más de 10,000 mm; la región del Caribe registra lluvias entre 500 y 2,000 mm, mientras que la región Andina posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias relativamente escasas (hasta 2,000 mm) a lo largo de la cordillera Oriental, en los valles del Alto Magdalena y Alto Cauca, pero con núcleos máximos (de 3,000 a 5,000 mm) en las cuencas del Medio Magdalena y el Medio Cauca.

En la Orinoquia predominan las lluvias altas (2,000 a 3,000 mm) en su parte central y oriental, aun cuando hacia el piedemonte pueden observarse precipitaciones de hasta 6,000 mm; por el contrario, en el extremo norte de Arauca las lluvias pueden ser menores de 1,500 mm; la mayor parte de la Amazonia recibe entre 3,000 y 4,500 mm por año (Ideam, 2000).

El anterior patrón general de lluvias, presenta sin embargo grandes desviaciones a este comportamiento de región a región, en razón a la abrupta topografía o a otros factores de meso y macroescala (Mapa IC, **Anexo I**).

#### ***2.2.2.5. Evapotranspiración potencial***

La evapotranspiración potencial (ETP) es un elemento importante del balance hídrico, pues determina las pérdidas de agua desde una superficie de suelo en condiciones definidas en

cuanto a la cobertura vegetal y tipo de suelo; la cuantificación de las pérdidas es indispensable para el cálculo del agua disponible en el suelo, la cual puede ser utilizada por las plantas en su crecimiento y producción. En el mapa ID del **ANEXO I**, se presenta la distribución de la evapotranspiración potencial media anual en Colombia.

### ***2.2.3. Oferta hídrica en Colombia***

El Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales IDEAM (2001), establece el marco conceptual de la demanda hídrica para Colombia y anota que el mayor volumen de agua es utilizada en las actividades agropecuarias; sin embargo, su uso crítico tiene que ver con el abastecimiento intensivo de agua potable para la población, el agua necesaria para los procesos industriales, el agua corriente para la generación de energía eléctrica y el agua para los sistemas de riego.

Además del marco conceptual y los criterios considerados para la estimación de la oferta del recurso, se realiza la cuantificación y distribución espacial del mismo, con diferentes unidades de análisis, para condiciones hidrológicas de año hidrológico medio y seco, así como su variación anual y mensual.

#### ***2.2.3.1. Balance hídrico nacional***

Para la determinación cuantitativa de los procesos físicos que contribuyen a la formación y a la variación espacio-temporal del recurso hídrico en una zona determinada, el IDEAM

utiliza el balance hídrico, formulación matemática de la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases; este balance se basa en la ley física universal de conservación de masas y representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica; expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro, incluyendo las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado.

La oferta hídrica se determina fundamentalmente cuantificando los términos de la ecuación del balance hídrico, aplicando el principio de conservación de masa, también conocida como ecuación de continuidad; además se establece que para cualquier volumen y durante un determinado tiempo, la diferencia entre las entradas y las salidas de agua está condicionada por la variación del volumen almacenado.

Para obtener el balance hídrico Nacional, el IDEAM simplifica la ecuación (2.1) del balance hídrico incluyendo únicamente la precipitación (P), la escorrentía (Esc<sub>sup</sub>), la evapotranspiración real (ETR) y el término residual de discrepancia (Der), debido a que la variación de los almacenamientos de los cuerpos de agua y las salidas y entradas del agua subterránea se compensan durante un año, de este modo la ecuación utilizada fue la siguiente:

$$P - \text{Esc (sup)} - \text{ETR} \pm \text{Der} = 0 \quad (2.1)$$

El anterior estudio también tuvo en cuenta la evaluación de la evapotranspiración potencial, la temperatura, entre otros factores, basada en las series históricas de más de 400 estaciones hidrológicas, 2,000 pluviométricas (de precipitación) y 300 meteorológicas. Con estos parámetros interrelacionados se determinó el comportamiento de las diferentes fases del ciclo hidrológico, cuantificando la disponibilidad del recurso hídrico para las regiones del país (45 grandes cuencas).

Con los valores de precipitación obtenidos a partir de las observaciones y mediciones de la red pluviométrica y pluviográfica distribuida en todo el territorio, se generó el mapa de isoyetas medias anuales; en tanto que con la información hidrológica, incluidas las características fisiográficas y morfométricas de los sistemas hidrográficos, se elaboraron las isolíneas de rendimiento y de escorrentía, que caracterizan áreas hidrológicamente homogéneas.

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se utilizó el método de estimación mediante la diferencia entre la precipitación y la escorrentía, el cual es avalado por la UNESCO, este método se adoptó dado que las fórmulas empíricas para la estimación de la ETR daban errores superiores al 15%.

Como resultado del estudio se pudo determinar el índice de aridez para las 45 principales cuencas como una característica cualitativa del clima, que muestra en mayor o menor grado la insuficiencia de los volúmenes precipitados para mantener la vegetación, por

esta razón suele llamarse también ‘déficit de agua’. La expresión matemática (2.2) del índice es:

$$I_a = (ETP - ETR) / ETP \quad (2.2)$$

Donde  $I_a$  es el índice de aridez, ETP: es la evapotranspiración potencial en (mm) y ETR: es la evapotranspiración real en (mm).

Igualmente se establecieron cinco condiciones cualitativas o categorías que muestran el grado de disponibilidad de agua en las diferentes regiones del país delimitadas cartográficamente (Mapa IIA, **ANEXO II**).

Las categorías propuestas para el índice de aridez fueron: Cuencas altamente deficitarias de agua  $> 0.60$ , deficitarias  $0.50 - 0.59$ , entre normales y deficitarias  $< 0.40 - 0.49$ , normales  $0.30 - 0.39$  y con excedentes  $< 0.15$  (Mapa IIA, **ANEXO II**).

### ***2.2.3.2. Cuantificación de la oferta hídrica***

El agua en Colombia no está distribuida homogéneamente en las diferentes regiones, pero sí sometida a fuertes variaciones que determinan su disponibilidad; razón por la cual en el territorio Nacional, se encuentran regiones tanto deficitarias como con grandes excedentes de agua (IDEAM, 2001).

Para determinar la oferta hídrica se cuantifican los volúmenes de agua, tanto de la escorrentía asociada a los rendimientos hídricos (producción de agua por unidad de superficie), como los asociados a los caudales que van acumulándose por drenajes aguas arriba de las unidades hidrográficas consideradas en cada caso.

Para la estimación de la oferta hídrica fueron consideradas tres unidades de análisis: los sistemas hidrográficos de referencia que cubren todo el país; el área municipal como generadora de agua, a partir del rendimiento hídrico de su territorio y las áreas de las fuentes que abastecen las cabeceras municipales. Dicha estimación se redujo de acuerdo con los siguientes criterios: reducción de la oferta por regiones naturales, aplicando un porcentaje global en función de la actividad humana; en aquellas regiones con mayor contenido de material contaminante, la reducción para el municipio se estimó en 50% y para sus cabeceras municipales en 40%. En las regiones con una actividad antrópica menos significativa y con grandes excedentes de agua, se aplicó una reducción de 40%, tanto para los municipios, como para las cabeceras municipales; para obtener la oferta hídrica neta se requiere además tener en cuenta el caudal necesario para mantener el régimen hidrológico mínimo y sostener los ecosistemas, incluyendo las restricciones de la disponibilidad de agua para diferentes usos por las alteraciones de su calidad.

El comportamiento de la oferta anual, se evaluó para condiciones hidrológicas de un año normal (medio), definido como aquél cuya escorrentía corresponde al valor medio multianual de series históricas de caudales representativos, y para un año seco identificado como el de

menor valor anual, tomando en ambos casos como base los caudales de las series representativas y su distribución mensual.

#### 2.2.3.2.1. Oferta hídrica en cuencas hidrográficas

Se evaluó la oferta de cada uno de los sistemas hidrográficos de referencia, considerando las isolíneas de escurrimiento del balance hídrico nacional; se estimó el volumen entre isolíneas contiguas de escurrimiento, mostrándose la variación a lo largo de cada cuenca, así como el volumen total correspondiente; adicionalmente, se estimaron los volúmenes disponibles, considerando no sólo los generados en su propia área, sino los producidos y acumulados aguas arriba.

Posteriormente para lograr en cada una de las cuencas una aproximación a la condición hidrológica más desfavorable, se seleccionó el mes seco, definido como aquél con el menor valor promedio del año, tomando como base los datos característicos de las series de caudales históricos.

#### **2.2.4. Demanda hídrica**

Las actividades humanas requieren del uso intenso de agua, tanto para cubrir las necesidades básicas de tipo biológico y cultural, como para el desarrollo económico de la sociedad. Por ello, en la cuantificación de la demanda se integran todas las actividades que



requieren el recurso hídrico, mostrando su comportamiento y distribución en el tiempo para planificar su uso sostenible.

#### ***2.2.4.1. Cuantificación de la demanda y los usos del agua***

La demanda de agua para el año 2000 y las proyecciones para 2015 y 2025, se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios: Demanda de la población por habitante (DHT), las estimaciones fueron realizadas mediante el uso de coeficientes estándares de demanda por habitante, de acuerdo con las necesidades de consumo básico diario, diferenciados por cabecera y resto (zona rural) para cada uno de los municipios.

Un estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Fondo Nacional de Desarrollo (Fonade) (1991), destinado a determinar el consumo básico de agua en algunas ciudades de Colombia, pudo establecer la cantidad del recurso suficiente para satisfacer las necesidades primarias de una familia, basadas en el análisis de once usos: lavado de ropas, sanitario, ducha, lavado de platos, aseo de la vivienda, consumo propio, lavado de manos, riego de plantas, riego de jardines, lavado de autos y piscinas recreativas.

El anterior estudio permitió establecer los coeficientes de consumo básico diario de agua (medido en litros/persona/día), para los usos que la población considera como básicos (lavado de ropas, sanitario, ducha, lavado de platos, aseo de la vivienda, consumo propio, lavado de manos); según la estratificación socioeconómica de las ciudades donde se realizó el estudio,

estos coeficientes se encuentran en un rango cuyo límite inferior es 114 L/hab/día y el superior 161 L/hab/día.

A partir de este estudio, el IDEAM estimó, en 1998, promedios de consumo de 170 L/hab/día, para las zonas urbanas, y 120 L/hab/día, para las rurales, en base a esta estimación y teniendo en cuenta las proyecciones de población, de acuerdo a la tasa geométrica de crecimiento promedio anual intercensal de los censos 1985 y 1993, se calculó la demanda total de agua para consumo humano a nivel municipal para el periodo 1996-2016.

En un segundo estudio el IDEAM (2000), utilizó los mismos promedios de consumo del estudio anterior (170 L/hab/día, para las zonas urbanas, y 120 L/hab/día, para las rurales), pero teniendo en cuenta las proyecciones de población de 1995 hasta 2005, calculadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), y las realizadas por el convenio IDEAM-CIDSE (Universidad del Valle) para los años 2015 y 2025, según la metodología de diferenciales de crecimiento urbano-rural usando la fórmula logística.

A continuación se presenta la demanda de agua de algunos sectores de gran relevancia en los procesos culturales y económicos en Colombia, teniendo en cuenta los Estudios Nacionales del Agua realizados por el IDEAM.

***Demanda industrial urbana y de grandes consumidores.*** Los valores de la demanda industrial urbana (DIU) y de la demanda industrial de grandes consumidores (DIG) se

estimaron de acuerdo con el crecimiento real de la economía a partir de 1997 sobre la demanda potencial de agua para la industria en 1996.

***Demanda de los sectores comerciales y de servicios.*** Para estimar la demanda de agua de los sectores comerciales y de servicios (DS) en el 2000, se proyectó el valor obtenido en el primer estudio nacional del agua (IDEAM, 1998), basándose en el crecimiento real del sector de servicios, obteniendo los siguientes porcentajes: 1.26% en 1997, 1.68% en 1998, 0.90% en 1999 y 0.03% para el 2000.

***Demanda pecuaria.*** La demanda pecuaria (DP) se calculó para el año 2000 proyectando los valores del estudio nacional del agua (IDEAM, 1998) a tasas de crecimiento real anual del sector pecuario, encontrando: 1.18% para 1997, 1.89% para 1998, -2.76% para 1999 y 2.65% para 2000.

***Demanda de distritos de riego grandes y pequeños.*** La demanda potencial de agua para el sector agrícola se expresa como la demanda de los distritos de riego grandes (DRG) y de los pequeños (DRP); para los primeros se tomó como referencia el caudal encontrado en el informe del Instituto Nacional para Adecuación de Tierras (INAT) de 1993, mientras que para los pequeños se proyectaron los valores del IDEAM en 1998. Los valores obtenidos fueron: 0.96% para 1997, -3.45% para 1998, 1.21% para 1999 y 1.66% para 2000.

***Demanda hidroeléctrica (DEH).*** El uso de agua para la generación hidroeléctrica se estima aproximadamente en 48,000 millones de metros cúbicos al año, equivalentes a más de diez veces el resto de los usos o demandas estimadas, sin embargo sus valores no se han considerado en el anterior estudio, debido a que el agua usada en la generación retorna totalmente al cauce sin mayores afectaciones de calidad.

Con relación al anterior aspecto, el Ideam (2001), en su estudio “Flujo de materiales y energía en la economía Colombiana”, expone que la fuente de energía renovable que más se usa en el país es el potencial hídrico; la capacidad efectiva del sistema de generación eléctrica en el país, fue 10,600.5 Mw en 1996, de ellos 8,016.4 Mw (76%) originados en plantas hidráulicas y 2,584.2 Mw (24%), en plantas térmicas.

De otro lado, es importante resaltar que la participación de la oferta de energía hidroeléctrica, ha aumentado en 5.7% para un periodo analizado desde 1975 a 1996; mientras que las proyecciones a 2010 del crecimiento de la demanda es de 5.5%.

De acuerdo al plan de expansión del sector eléctrico en Colombia, se debe contemplar que en el mediano plazo el desarrollo hidroeléctrico se realice mediante la instalación de pequeñas y medianas centrales (menos de 100 MW). Se argumenta igualmente que el potencial estimado para pequeñas centrales (menos de 5 MW) es de 25,000 MW, de los cuales se han aprovechado 168.2 MW. (Ideam, 2001)

### ***2.2.5. Relaciones demanda, oferta y vulnerabilidad***

De acuerdo con el IDEAM (2000), es importante describir los criterios, estimaciones y análisis de las relaciones entre el agua potencialmente necesaria para cubrir las necesidades de la población y las actividades productivas en relación con el agua disponible. Así mismo, es imprescindible evaluar en forma general la vulnerabilidad de los sistemas hídricos que abastecen los municipios y sus cabeceras, en términos de disponibilidad para condiciones hidrológicas medias y secas.

Por lo expuesto anteriormente en esta investigación, igualmente se presenta el análisis de la relación oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú\_Caribe, Colombia, incluyendo las variables más relevantes y escenarios de cambio climático mediante la aplicación del WEAP.

#### ***2.2.5.1. Indicadores que caracterizan el recurso hídrico***

En la evaluación de la situación real de disponibilidad de agua en el país para abastecimiento y las posibles condiciones de sostenibilidad, se utilizaron dos indicadores sencillos y de fácil interpretación: el índice de escasez, que representa la demanda como porcentaje de la oferta, estimada para diferentes unidades espaciales y niveles temporales, y uno relacionado con la vulnerabilidad de los sistemas hídricos por disponibilidad de agua para suplir las demandas.

### **2.2.5.2. Índice de escasez**

Relaciona la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda predominantes en una unidad de análisis seleccionada; expresa la medida de escasez en relación con los aprovechamientos hídricos como un porcentaje de la disponibilidad de agua; cuando los aprovechamientos representan más del 20% del agua disponible, indica que es necesario ordenar la oferta con la demanda para prevenir futuras crisis; porcentajes menores del 10% supone menores problemas de manejo y entre 10 y 20% indica que la disponibilidad es limitada (Naciones Unidas, 1997).

Para el contexto colombiano y los propósitos del IDEAM, el índice de escasez fue agrupado en cinco categorías: No significativo (< 1%, demanda no significativa con relación a la oferta), mínimo (1-10%, demanda muy baja con respecto a la oferta), medio (11-20%, demanda baja con respecto a la oferta), medio alto (21-50%, demanda apreciable) y Alto (> 50%, demanda alta con respecto a la oferta).

Para tener una idea más clara de dónde se tiene mayor presión y teniendo en cuenta la anterior relación en las grandes cuencas del país, se ajusta un nuevo indicador de la presión de la demanda sobre la oferta, denominado índice de presión, que amplifica el índice de escasez por cien mil, así: mínimo (< 49), bajo (49-119), medio bajo (120-249), medio (250-499), medio alto (500-999), alto (1,000-4,000) y muy alto (>4,000). (Mapas IIB y IIC, **ANEXO II**).

### 3. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo consta de cinco fases.

#### **3.1. Fase 1. Recopilación de información.**

1. Recopilación, procesamiento y análisis de la información secundaria necesaria en el sector elegido.

Luego de una revisión bibliográfica exhaustiva, se seleccionaron dos cuencas en Colombia (Cuenca del Bajo Magdalena y Cuenca del Sinú-Caribe, *Figura 1*), teniendo como criterios de selección los índices de escasez, presión y aridez (con relación a la oferta-demanda del recurso hídrico, **ANEXO III**), encontrados en recientes estudios realizados por el Ideam (2000, 2001). Las cuencas presentan diferencias o contrastes significativos con relación a los índices mencionados; además, las tres cuartas partes del área total de las cuencas (30,000 Km<sup>2</sup> de la Sinú-Caribe y 45,000 Km<sup>2</sup> de la del Bajo Magdalena), están afectadas por procesos de desertificación<sup>1</sup> y se ha perdido la mayoría de los bosques y elementos protectores y reguladores de recursos hídricos. A nivel Nacional la cuenca que mayor extensión tiene en zonas en desertificación es la del bajo Magdalena.

---

<sup>1</sup> Según la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD), la desertificación es la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica del sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos ecológicos e hidrológicos, especialmente en los ecosistemas de las zonas secas (áridas, semiáridas y subhúmedas secas), debido a los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y factores climáticos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Por otra parte la Cuenca del Sinú-Caribe está dedicada en parte a la generación y distribución de energía hidroeléctrica.

En el área de estudio se seleccionaron 5 estaciones meteorológicas, con los siguientes códigos y ubicación: 2904511, 10.50°N-75.03°W; 2906503, 10.46°N-74.10°W; 2903511, 10.03°N-75.15°W; 1307502, 08.55°N-75.35°W y 2502524, 08.32°N-74.37°W con información suficiente para los propósitos del presente trabajo y que se encuentran exactamente dentro de las celdas de los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) utilizados en este estudio, así: la celda 10°N-75°W contiene las estaciones 2904511, 2906503 y 2903511, en la Cuenca del Bajo Magdalena y la celda 7.5°N-75°W contiene las estaciones 1307502 y 2502524, en la Cuenca del Sinú-Caribe. Las estaciones tienen registros diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación para más de treinta años, la mayoría de ellas para el periodo de 1964-2005. La base de datos utilizada fue brindada por el Ideam.

2. Con los datos de las estaciones seleccionadas, se analiza el comportamiento de las variables climáticas en el área de estudio, como punto de partida para los posteriores análisis y generación de escenarios.

La *tabla 1* resume la ubicación de las estaciones en cada cuenca y las celdas de los modelos de circulación general, solo para el HadCM3 y la aplicación del SDSM.



**Tabla 1.** Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas.

<i>Cuenca</i>	<i>Código estación</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Ubicación celda del modelo HadCM3 para la aplicación de SDSM</i>
Sinú-Caribe	1307502	08.55°N-75.35°W	7.5°N-75°W
	2502524	08.32°N-74.37°W	
Bajo Magdalena	2904511	10.50°N-75.03°W	10°N-75°W
	2906503	10.46°N-74.10°W	
	2903511	10.03°N-75.15°W	

### 3.2. Fase 2. Proyecciones, simulación y comparación de modelos.

Para esta fase se tuvieron en cuenta las salidas del modelo de circulación general acoplado, atmósfera océano (AOGCM) del “Hadley Center” del Reino Unido (HadCM3) (información detallada acerca del modelo se encuentra en Mitchell, 2004), para las celdas 10°N-75°W y 7.5N-75°W, bajo dos escenarios de emisiones A2 y B2<sup>2</sup>. De acuerdo con el (IPCC, 2001) los nuevos escenarios sirven de base para evaluar las consecuencias climáticas y ambientales de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y para elaborar las estrategias de mitigación y alternativas de adaptación al cambio climático.

Dichos escenarios representan las emisiones como resultado de supuestos sobre el desarrollo del planeta, en términos del incremento económico, de la población, y de diferentes vías de desarrollo tecnológico.

La familia de los escenarios A2, por ejemplo, describe un mundo muy heterogéneo, donde se consideran diferentes formas de autosuficiencia y conservación de las identidades locales, una población mundial en continuo crecimiento; el desarrollo económico está

<sup>2</sup> El IPCC ha generado diversos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, reportados en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés), (IPCC, 2001).

orientado básicamente en las economías regionales, y en relación a un cambio tecnológico acorde con lo anterior (IPCC, 2001). La familia de los escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones económicas, sociales y ambientales a nivel local, por la vía del desarrollo “sostenible”; en el se considera un aumento poblacional progresivo a un ritmo menor que en A2 (IPCC, 2001; Levy, et al, 2004), con niveles de desarrollo económicos intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en los escenarios B1 y A1 (IPCC, 2001). Este escenario está orientado a la protección del medio ambiente, la igualdad social, y se centra principalmente a niveles locales y regionales (IPCC, 2001).

El *ANEXO V* describe las principales características de las diferentes familias de escenarios reportadas en el SRES.

1. Utilizando las salidas del modelo HadCM3, bajo los escenarios de emisiones A2 y B2 (teniendo este último características mas ambientales) y tomando en cuenta las características del clima actual, se analiza a nivel regional, el potencial cambio climático proyectado y su incidencia sobre los parámetros hidrometeorológicos para los periodos 2010- 2039 (2020s), 2040-2069 (2050s) y 2070-2099 (2080s), mediante la aplicación del SDSM<sup>3</sup> (Statistical Downscaling Model), específicamente sobre las variables temperatura y precipitación, encontrando posteriormente su relación con caudales.

---

<sup>3</sup> De acuerdo a comparaciones de los resultados (de la precipitación diaria, temperaturas máximas y mínimas diarias) arrojados por tres modelos de reducción de escala: Modelo estadístico de reducción de escala (SDSM, por sus siglas en inglés), Modelo generador de largas series de tiempo del centro de investigación de Ashton (LARS-WG, por sus siglas en ingles) y el Modelo artificial de red neural (ANN, por sus siglas en inglés), usando 40 años de datos observados y los simulados, Sajjad M. et al (2006) encuentran que el SDSM es el más capaz de reproducir varias características estadísticas de datos observados a un nivel de confiabilidad del 95%, el ANN es el de menor ajuste (mayor incertidumbre) y el LARS-WG es intermedio.

Después de haber realizado las estimaciones para las condiciones actuales de la precipitación en cada estación y en ambas Cuencas, se hicieron varias pruebas para comparar los datos observados y los estimados en cada una de las estaciones y sus promedios utilizando el “Statgraphics Plus 4.0”, con el propósito de observar si existen o no diferencias estadísticamente significativas.

El anterior análisis permite calcular el balance hídrico actual y proyectado para los periodos propuestos en ambas cuencas, mediante el método de balance hidrológico de *Thorntwaite*, (se puede consultar en <http://climate.geog.udel.edu/~wimp/>).

2. Con las variables anteriormente analizadas y utilizando la base de datos brindada por ISA (Inter\_Conexión Eléctrica. S.A.-Colombia) de aporte de caudal del Río Sinú al embalse Urrál (periodo 1974-2004), ubicada en la zona de estudio, se probaron diferentes regresiones para tratar de averiguar la relación entre los caudales y las demás variables: temperatura máxima (Tmax), temperatura media (Tmed), temperatura mínima (Tmin), precipitación acumulada mensual y anual (PCP).

3. Con el propósito de obtener información acerca de posibles incertidumbres inmersas en el proceso de modelación se tuvieron en cuenta los resultados de 17 modelos contenidos en MAGICC-SCENGEN<sup>4</sup>, para los mismos periodos 20s, 50s, 80s y los escenarios A2 y B2.

---

<sup>4</sup> Se han desarrollado modelos climáticos simples que permiten incorporar la gama de escenarios de emisiones a los estudios de cambio climático; estos modelos pueden simular la respuesta del clima global a cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en términos del incremento de la temperatura y el aumento del nivel del mar. Dentro de estos modelos simples está el Modelo para la Evaluación de Gases de Efecto de Invernadero \_ Gases que Inducen Cambio Climático (Magicc, por sus siglas en Inglés). Para combinar los resultados del Magicc con las salidas de los modelos de circulación general, es necesario utilizar el programa Generador de Escenarios (Scengen, por sus siglas en Inglés), ( Wigley, 1994; Hulme et al, 2000; Conde, 2003).

Adicionalmente se analizaron las salidas de los experimentos realizados por el Instituto Canadiense para Estudios Climáticos (CICS, por sus siglas en Inglés), para los escenarios reportados en el SRES y las familias de emisiones A2 y B2, en los periodos de tiempo anteriormente mencionados y en las celdas determinadas en cada modelo, pero correspondientes al área de estudio, (<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/data/select.cgi>).

### ***3.3. Fase. 3. Sensibilidad y vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico***

1. Los resultados obtenidos, permiten construir una serie de escenarios de sensibilidad en muchos sectores y/o sistemas, en particular el caso del recurso hídrico \_ generación de energía hidroeléctrica. Para dichos escenarios se recopiló información adicional más detallada del área de estudio y la represa Urrá 1 como: oferta\_demanda del recurso, población actual, proyecciones de crecimiento poblacional, aspectos técnicos y operativos de la represa, batimetría (**ANEXO IV**) y evaporación en vaso. La información fue obtenida de diversas fuentes vía Internet y en algunos casos otorgada directamente por funcionarios de las siguientes instituciones: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), UPME, Ideam, Consejo Nacional de Operación Sector Eléctrico (CNO), Empresa Urrá.

2. Mediante el uso del Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP), que permite realizar simulaciones integradas de los sistemas del agua y orientar las políticas de manejo, se elaboraron varios experimentos de sensibilidad en el sector de generación hidroeléctrico, de acuerdo a las diferentes proyecciones del clima, determinados anteriormente.

### 3. Propuesta de un índice de vulnerabilidad para la generación hidroeléctrica.

El índice propuesto se calcula como un promedio ponderado de la siguiente forma:

a) Los cambios en las variables Tmax y PCP que dan una buena explicación a los cambios en caudal y por ende a la generación de energía hidroeléctrica, fueron categorizadas o inscritas dentro de ciertos rangos (alto, medio, bajo, muy bajo u otros); las calificaciones otorgadas a los rangos obtenidos para cada variable se realizaron de acuerdo a una escala jerárquica de 1 a 5 según se consideró el grado de afectación en la generación eléctrica, siendo uno poca afectación o impacto y cinco máxima afectación.

b) Finalmente para el cálculo del índice de vulnerabilidad, las variables fueron multiplicadas por un coeficiente según la importancia o el peso de cada una en el modelo y luego relativizados por la suma de ponderantes, además las variables se calificaron de acuerdo a su presencia o no en los diferentes experimentos o escenarios, tomando el valor de uno (1) cuando esta presente y cero (0) en caso contrario.

c) El paso anterior permite encontrar la magnitud de la vulnerabilidad de la generación de energía hidroeléctrica en cada uno de los experimentos de sensibilidad y permite inferir sobre el grado (alto, medio o bajo) de afectación del sistema.

#### ***3.4. Fase 4. Análisis de la relación oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú.***

a. Se recopiló y analizó toda la información encontrada con relación a la oferta-demanda del recurso hídrico en varios estudios realizados por el Ideam (2000, 2001), de donde se extractaron diferentes variables como: consumo diario por persona en zona rural y urbana, consumo comercial, consumo industrial, oferta natural del recurso hídrico, descuentos de oferta por caudal ecológico y calidad del agua, proyecciones de aumento en el consumo y disminución de la oferta natural, entre otras; igualmente se determina el número de personas en el área de estudio, distribuidas en 28 cabeceras municipales (zonas urbanas) y sus zonas rurales y sus correspondientes proyecciones, realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE, 2005).

b. Se consideran los potenciales cambios climáticos para el periodo 2010-2039, específicamente en temperatura máxima (Tmax) y precipitación (PCP) proyectados por diferentes modelos de circulación general (CCSRNIES\_A21, CSIROCM2B\_A21, CGCM2\_A21, CGCM2\_A22, CGCM2\_A23, HadCM3\_A21, HadCM3\_A22, HadCM3\_A23, HadCM3\_A2\_SDSM), encontrados en la presente investigación.

##### **1. Proyecciones de la oferta natural.**

Con las anomalías de Tmax y PCP encontradas en las fases anteriores y los registros actuales de las variables en mención, es posible calcular la precipitación y la temperatura esperada mes por mes y año por año para el periodo de análisis, de acuerdo a los diferentes

modelos; además se recalcula el caudal para cada uno de los casos mediante la siguiente ecuación:  $AC = 1913.97 + 0.86078*PCP - 46.165*Tmax$ , donde AC: Aporte de caudal mensual ( $m^3/s$ ), la cual presento un buen ajuste.

2. Proyecciones, simulación de la relación oferta\_demanda del recurso hídrico y comparación de modelos.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en los anteriores pasos, mediante el uso del WEAP 21, se realizan las diferentes proyecciones y simulaciones de la relación oferta\_demanda y sus respectivos análisis, con el propósito de determinar aspectos fundamentales de la misma como: demanda insatisfecha, cobertura de la demanda, requerimientos de la oferta, suministro entregado, incremento de la demanda, índice de presión sobre el recurso, entre otros, de tal forma que se puedan generar elementos que ayuden a la planificación y manejo de los recursos hídricos de la cuenca y que permitan elaborar estrategias de adaptación ante los potenciales cambios climáticos.

### ***3.5. Fase 5. Recurso hídrico como factor limitante y optimización de la generación hidroeléctrica como estrategia de adaptación.***

1. Se determina la oferta natural neta del recurso hídrico actual y bajo condiciones de cambio climático y se estima la máxima cantidad de agua que es posible suministrar de acuerdo a la legislación Colombiana en ambos casos, estableciéndola como factores limitantes (Ks). Igualmente utilizando los datos extractados en el numeral anterior, se ajustaron modelos del requerimiento de la oferta (RO) y el suministro entregado (SE) con relación al tiempo,

asumiendo el RO como la verdadera demanda y el SE como la oferta o cobertura de la demanda.

2. Lo anterior permite encontrar la demanda insatisfecha actual y proyectada y se analiza el efecto de un posible escenario de adaptación. Además de acuerdo a los estudios realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2000-2001) el índice de escasez (I.E.) se puede calcular obteniendo la relación porcentual de la demanda respecto a la oferta, para lo cual se asume la oferta natural actual y proyectada bajo cambio climático como los factores  $K_a$  y  $K_{cc}$ , respectivamente, encontrados en el párrafo anterior.

3. Al estar la Cuenca relacionada con la generación de energía hidroeléctrica, en este punto se generan diferentes escenarios, con el propósito de mitigar y/o mejorar los efectos negativos proyectados en la generación de energía (identificados en el las fases anteriores) y la influencia de dichas estrategias sobre la demanda insatisfecha en la región, interviniendo específicamente los meses más críticos (Febrero-Abril).

Para lograr el anterior propósito se genera un nuevo sitio de demanda en la región de estudio denominado “Bombeo”, el cual tiene como función extraer agua de la fuente aguas abajo de la presa y suministrarla aguas arriba o en el sitio de presa.

El procedimiento establecido hace necesario el uso de herramientas matemáticas, estadísticas, métodos cuantitativos y modelos de simulación de cambio climático globales y



regionales, que permitan hacer y hallar relaciones cuantificables y georeferenciables de cada uno de los elementos o variables afectados positiva o negativamente, como por ejemplo: incremento o disminución en caudales, precipitaciones, temperatura, incremento o no de conflictos sociales y políticos, intensidad o magnitud de desplazamiento humano entre otros; además de ser necesario software especializados, computadoras con gran capacidad de memoria y procesamiento de datos, entre otros insumos.

La *Figura 1* presenta en forma resumida y esquemática los procedimientos metodológicos descritos anteriormente.

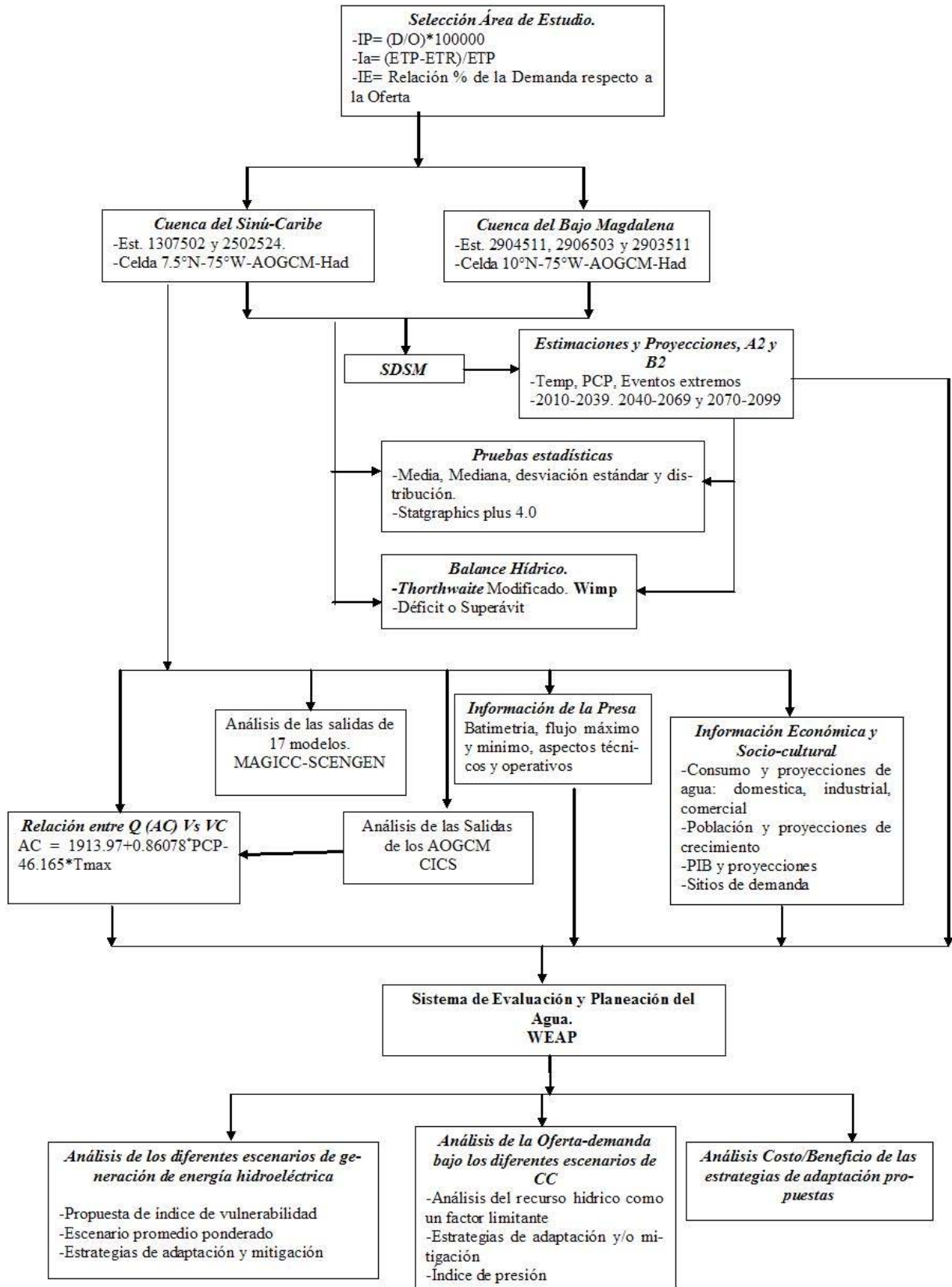


Figura 1. Esquema del procedimiento metodológico.

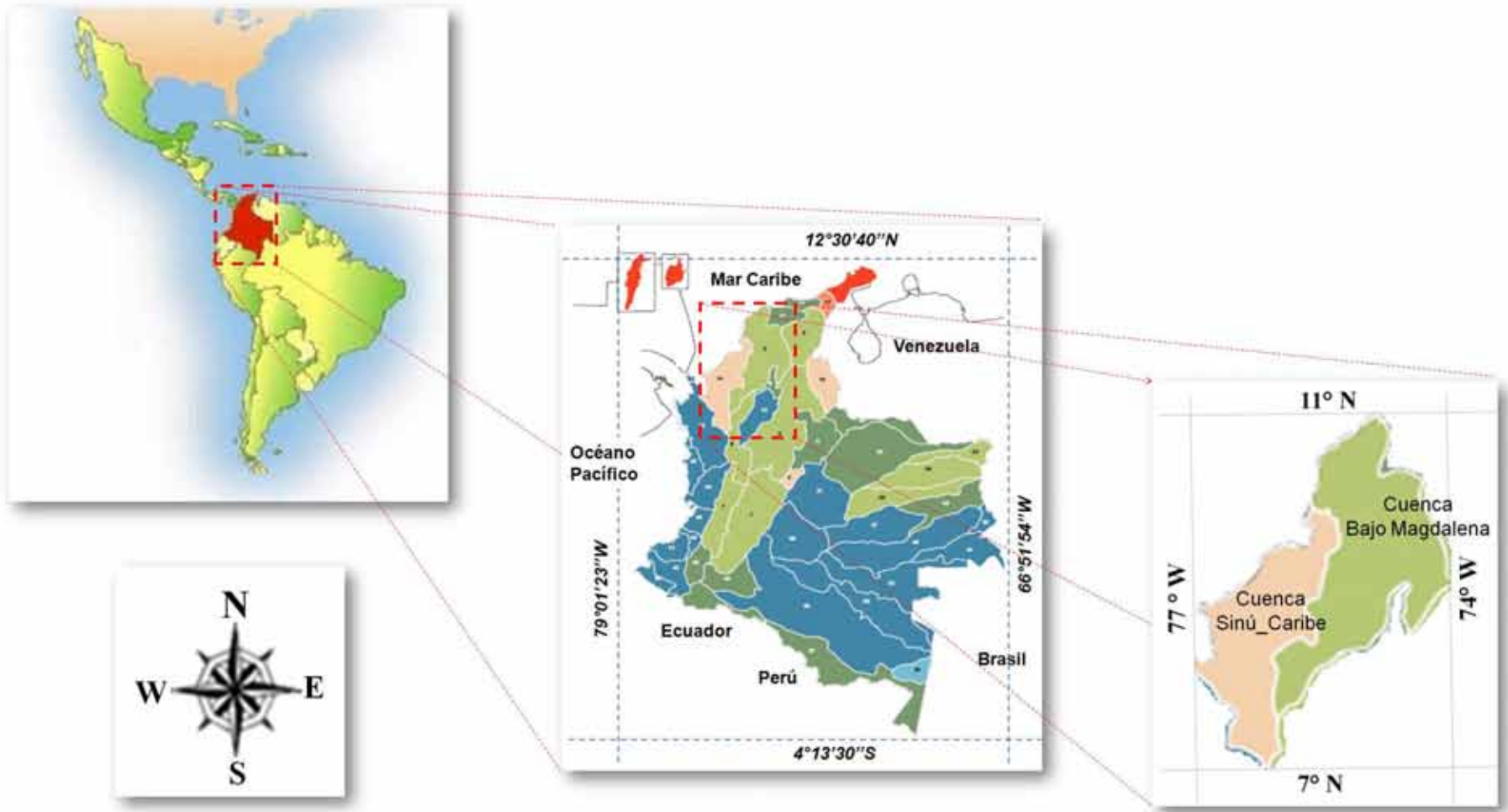
## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El área de estudio se ubica en la región Caribe al Noroeste de la República de Colombia, la *Figura 2* presenta la ubicación geográfica en el contexto Latinoamericano.

### *4.1. Análisis y comportamiento actual de las variables*

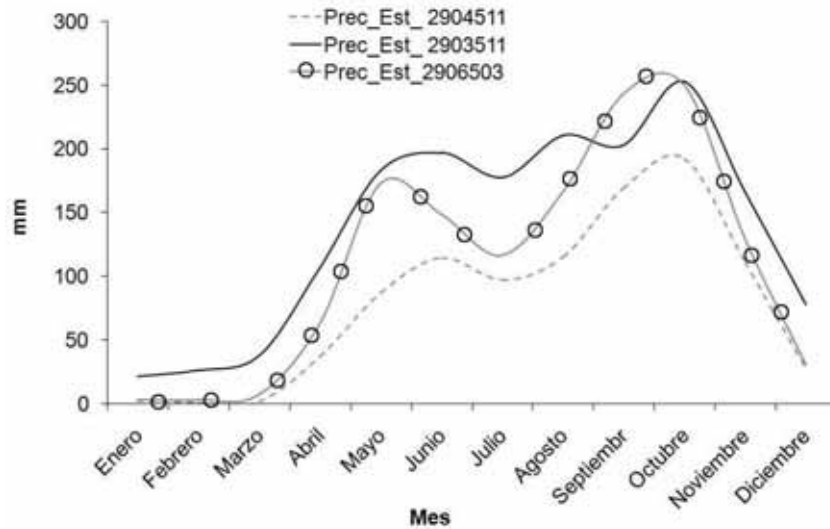
Con los datos de las estaciones seleccionadas en ambas cuencas, se presenta el análisis del comportamiento actual de los parámetros o variables climáticas en el área de estudio propuesta.

Al observar el comportamiento de la precipitación en el área de estudio (Cuenca del Bajo Magdalena), se deduce que hay dos épocas de mayores lluvias que van aproximadamente de Abril a Junio, en un rango de 50 a 200 mm de precipitación, dependiendo de la estación y, una segunda temporada de Septiembre a Noviembre con una precipitación de 100 a 250 mm. En todos los casos se presenta una reducción que va desde mediados de Junio a mediados de Agosto; presentando una aparente estructura bimodal. (Ver *Figura 3*).



*Figura 2.* Ubicación área de estudio.

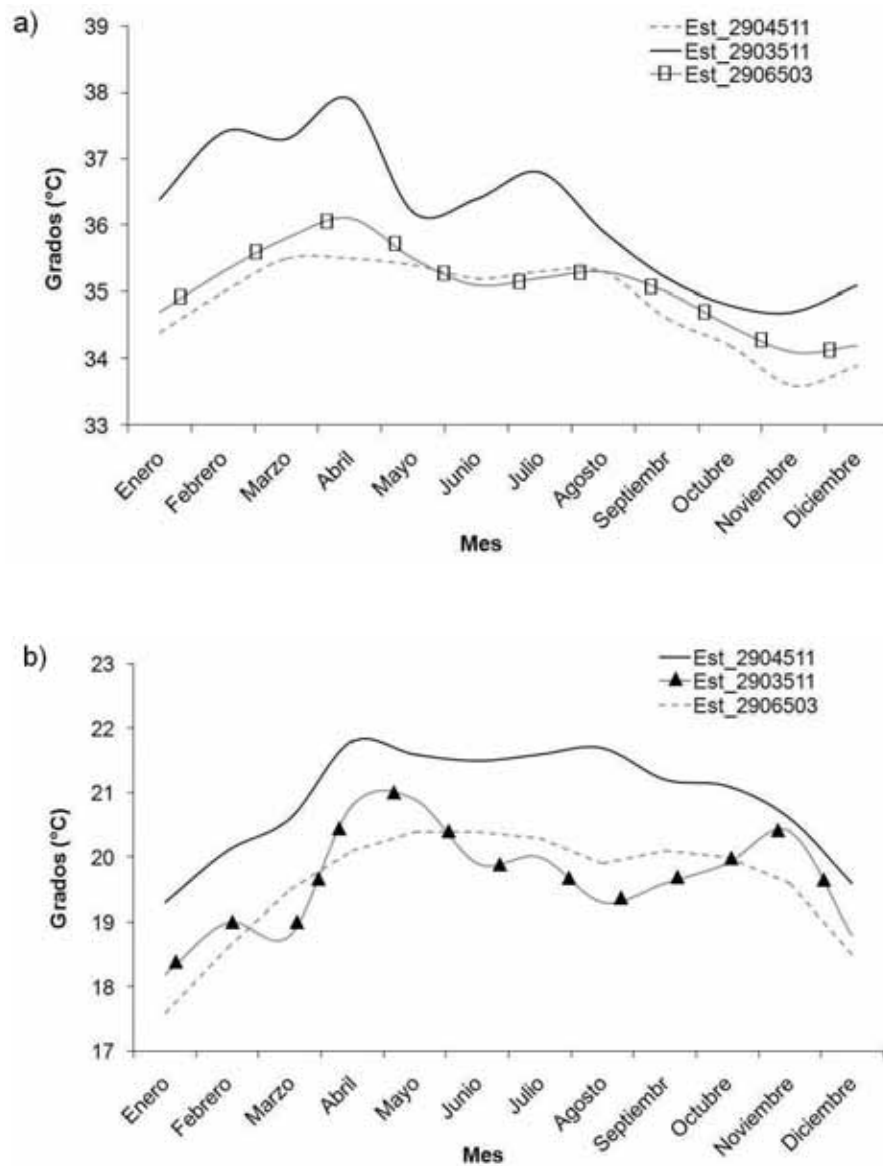
Comparando las curvas de precipitación entre estaciones, se observan importantes diferencias entre ellas, con una menor diferencia entre las estaciones 2904511 y 2906503; lo anterior sugiere el análisis de esta variable por separado, es decir, de cada una de las estaciones.



**Figura 3.** Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones 2904511, 2906503 y 2903511(celda 10°N-75°W)

Las **Figura 4a** y **b**, presenta el comportamiento mensual de las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones objeto de estudio; obsérvese que las temperaturas son mayores en aquellos periodos de menor precipitación y viceversa, identificados en el análisis anterior.

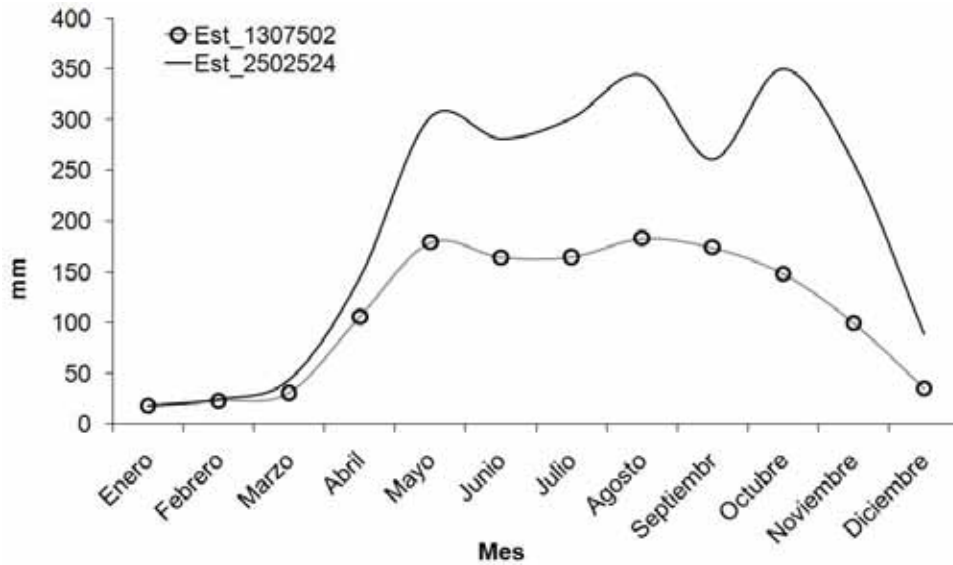
Los análisis del comportamiento actual de las variables se realizaron teniendo en cuenta los promedios históricos desde el año 1990 al 2004, en ambas cuencas y para todas las estaciones.



**Figura 4.** Variaciones mensuales de temperatura en las estaciones 2904511, 2906503 y 2903511(celda 10°N-75°W). a) Temperatura máxima. b) Temperatura mínima.

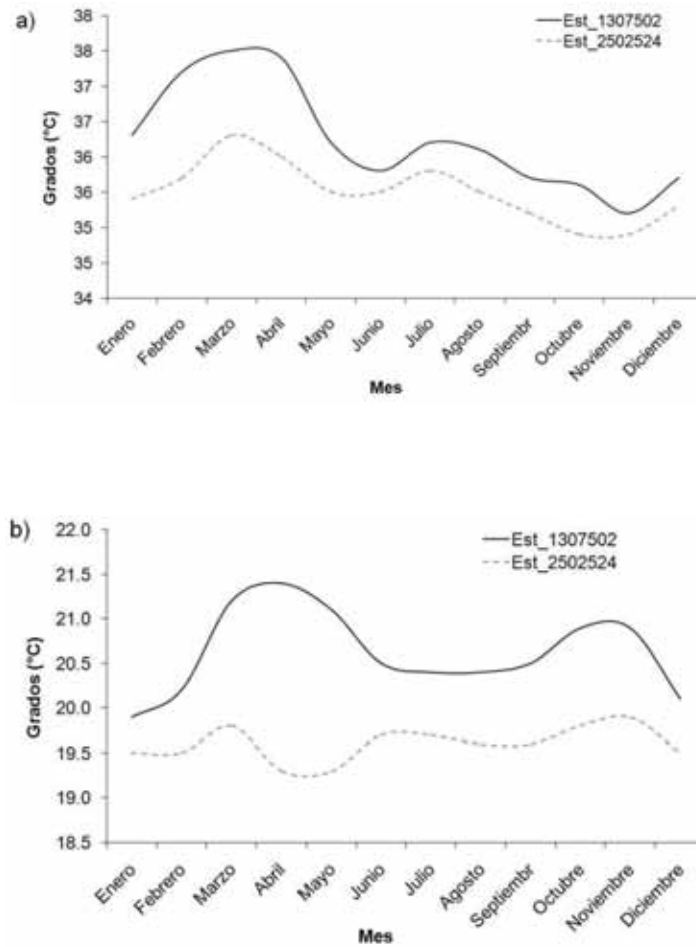
Si se compararan los valores de las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones 2904511 y 2906503, se encuentran diferencias relativamente pequeñas; es posible que tal hecho permita más adelante, hacer un análisis conjunto de estas dos estaciones.

Para las estaciones 1307502 y 2502524, en la cuenca del Sinú-Caribe, aunque presentan un comportamiento similar a las estaciones analizadas anteriormente, se observa una mayor precipitación mensual principalmente en la estación 2502524, alcanzando en algunos meses los 350 mm de precipitación (*Figura 5*).



*Figura 5.* Comportamiento de la precipitación mensual en las estaciones 1307502 y 2502524, (celda 7.5°N-75°W)

Las temperaturas máximas y mínimas son mayores en la estación 1307502, donde se registra la menor precipitación (*Figura 6a* y *b*). Es importante anotar que la estación 2903511 de la cuenca del Bajo Magdalena, presenta un comportamiento similar a las variables analizadas en la estación 1307502 de la cuenca Sinú-Caribe, siendo un poco menor la precipitación que se presenta en esta última.



**Figura 6.** Variaciones mensuales de temperatura en las estaciones 1307502 y 2502524, (celda 7.5°N-75°W). a) Temperatura máxima. b) Temperatura mínima.

#### 4.2. Proyecciones cuenca del Bajo Magdalena.

Utilizando las salidas de los modelos de circulación general (GCM) para la celda 10°N-75°W y con la estructura del clima presentada anteriormente, se analiza el potencial cambio climático proyectado y su incidencia sobre los parámetros hidrometeorológicos, mediante la aplicación del SDSM, específicamente sobre las variables temperatura y precipitación.



Los resultados presentados a continuación, tuvieron en cuenta las salidas del modelo HadCM3 del Reino Unido para la celda 10°N-75°W, bajo dos escenarios de emisiones A2 y B2. El escenario A2 es heterogéneo, de acuerdo a Levy, et al, (2004) para diferentes regiones del mundo, con menor crecimiento económico y poblacional que el A1. Lo que se inferiría, para este escenario es la confianza y preservación de identidades locales, y por lo tanto el crecimiento económico y cambios en la tecnología que son regionalmente diversas; el escenario B2, asume incrementos de población más bajos que el A2, siguiendo un desarrollo ambiental, económico y socialmente “sostenible” por las vías del desarrollo local.

Lo descrito anteriormente permite incluir en el análisis la importancia del efecto de los gases de invernadero, bajo diferentes condiciones de crecimiento poblacional, económico, cambios tecnológicos, además de poder observar las incidencias de programas, estrategias y mecanismos en cuanto a lo ambiental se refiere.

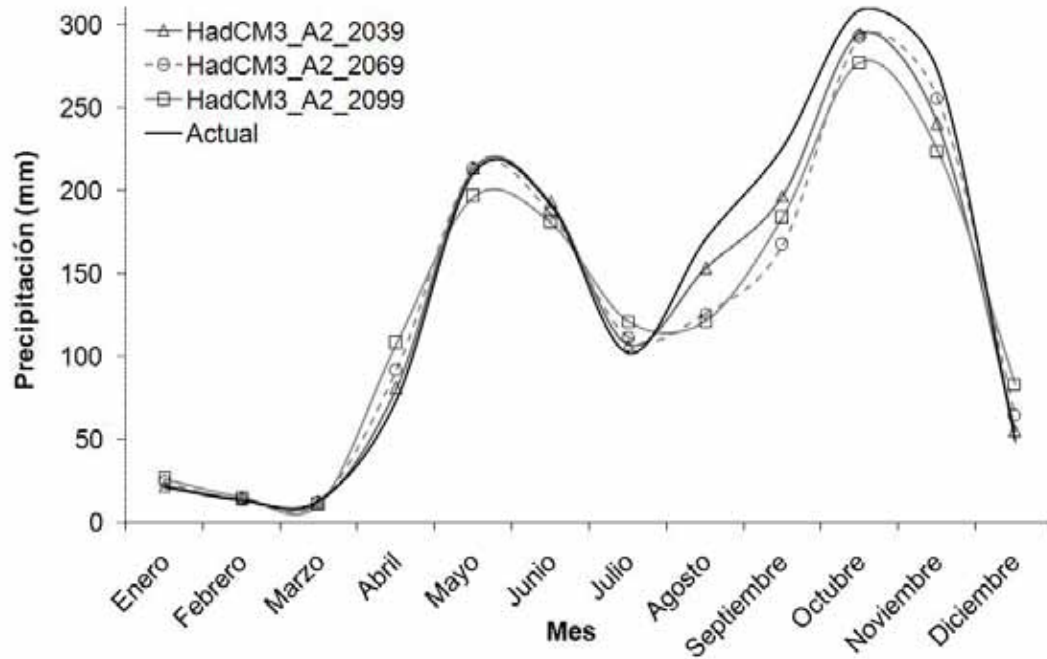
En el análisis estadístico realizado a los datos actuales (comportamiento actual) de la precipitación y a sus estimados en ambas cuencas, para cada una de las estaciones analizadas y para sus promedios, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confiabilidad del 95%, al aplicar las pruebas T, F, Mann-Whitney (Wilcoxon) y Kolmogorov Smirnov, que comparan la media, desviación estándar, mediana y distribución de las muestras respectivamente (**ANEXO VIA**).

En esta investigación se usaron los valores promedios, al considerar que son varios puntos representativos en la celda de estudio (10°N-75°W) y por lo tanto están más acordes con los datos del reanálisis.

La **Tabla 2** presentan la precipitación actual estimada y la proyectada para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099 teniendo en cuenta los dos escenarios, la **Figura 7** ilustra el escenario A2. Los valores proyectados son los promedios de cada uno de los periodos, así: 39-A2 (periodo 2010-2039, escenario A2), 69-A2 (periodo 2040-2069, escenario A2), 99-A2 (periodo 2070-2099, escenario A2), 39-B2 (periodo 2010-2039, escenario B2), 69-B2 (periodo 2040-2069, escenario B2), 99-B2 (periodo 2070-2099, escenario B2).

**Tabla 2.** *Precipitación proyectada Cuenca del Bajo Magdalena.*

Mes	Actual	39-A2	69-A2	99-A2	39-B2	69-B2	99-B2
Enero	21.1	21.7	24.1	26.2	22.4	23.7	24.8
Febrero	13.2	14.0	13.3	15.0	14.0	13.7	14.5
Marzo	13.3	11.8	12.3	10.7	12.6	10.7	11.8
Abril	73.8	80.8	92.1	107.9	83.5	90.0	96.8
Mayo	211.0	213.7	212.9	196.5	213.8	216.5	204.5
Junio	191.9	193.1	186.5	180.9	191.7	189.5	183.3
Julio	102.0	107.0	111.7	121.2	106.9	103.3	118.9
Agosto	170.6	153.0	126.0	121.2	135.6	133.6	122.6
Septiembre	226.2	196.8	167.4	183.9	189.1	175.1	178.9
Octubre	308.9	294.9	292.5	277.3	294.3	281.8	284.2
Noviembre	272.2	240.4	255.6	224.0	269.9	239.2	250.3
Diciembre	48.9	55.3	63.8	83.3	58.3	64.3	76.8
<b>Suma</b>	<b>1653.3</b>	<b>1582.7</b>	<b>1558.1</b>	<b>1548.1</b>	<b>1592.2</b>	<b>1541.4</b>	<b>1567.5</b>



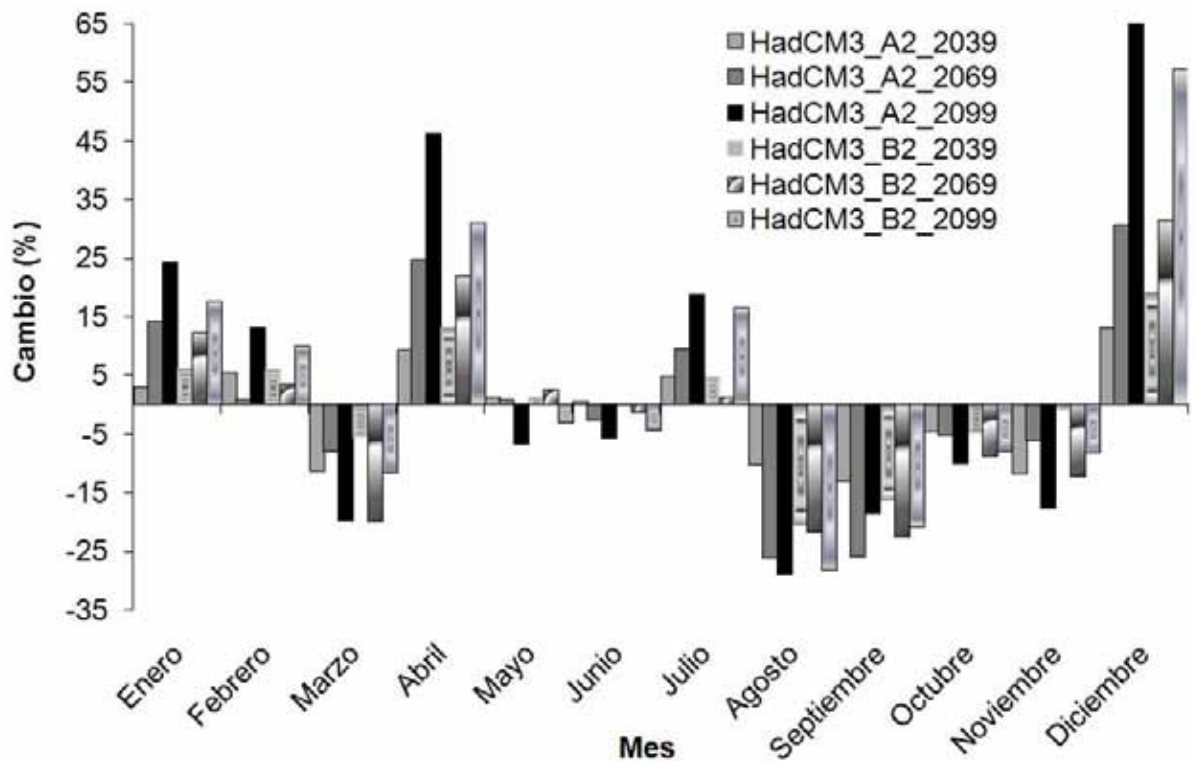
**Figura 7.** Precipitación actual y proyectada Cuenca del Bajo Magdalena, escenario A2.

Al observar con detalle la figura se percibe un mayor efecto del escenario A2 sobre la variable, en algunos trayectos (mediados de Octubre-principio de Diciembre) las proyecciones con el escenario B2, pronostican menores disminuciones de la precipitación que el escenario A2.

La **Tabla 3** y **Figura 8** muestran los porcentajes de cambio en la precipitación proyectada para ambos escenarios. Se puede observar que, todos los escenarios proyectan los mayores aumentos en enero, febrero, abril, julio y diciembre; en mayo se encuentran pequeños aumentos hasta el 2069 y disminuciones para el 2099; en el resto de los meses se tienen disminuciones importantes. Al analizar la precipitación acumulada anual, se encuentra una reducción para todas las proyecciones en ambos escenarios.

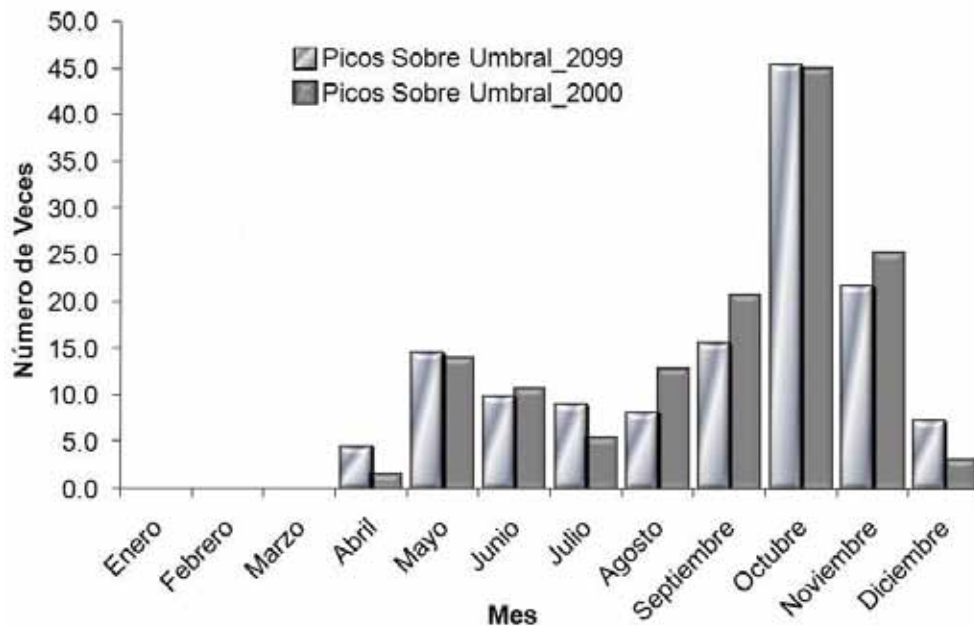
**Tabla 3.** Aumento y/o disminución de la precipitación en %.

Mes	39-A2	39-B2	69-A2	69-B2	99-A2	99-B2
Enero	3.0	6.1	14.1	12.3	24.3	17.5
Febrero	5.6	6.0	0.8	3.5	13.1	9.9
Marzo	-11.3	-5.4	-8.0	-20.0	-19.9	-11.5
Abril	9.4	13.1	24.7	21.9	46.1	31.0
Mayo	1.3	1.3	0.9	2.6	-6.9	-3.1
Junio	0.7	-0.1	-2.8	-1.2	-5.7	-4.4
Julio	4.9	4.8	9.5	1.2	18.8	16.6
Agosto	-10.3	-20.5	-26.2	-21.7	-28.9	-28.1
Septiembre	-13.0	-16.4	-26.0	-22.6	-18.7	-20.9
Octubre	-4.6	-4.7	-5.3	-8.8	-10.2	-8.0
Noviembre	-11.7	-0.9	-6.1	-12.1	-17.7	-8.1
Diciembre	13.1	19.3	30.5	31.5	70.4	57.2
<b>Anual</b>	<b>-4.3</b>	<b>-3.7</b>	<b>-5.8</b>	<b>-6.8</b>	<b>-6.4</b>	<b>-5.2</b>

**Figura 8.** Escenarios de anomalías mensuales de precipitación Cuenca del Bajo Magdalena.

Algunas de las características de las cuencas en estudio es la susceptibilidad a las inundaciones y por ende daños a diferentes infraestructuras y sectores productivos, dada por precipitaciones extremas locales y no locales, lo cual hace importante indagar sobre algunos eventos y/o periodos donde se pueda sobre pasar un umbral previamente determinado.

La **Figura 9**, ilustra los meses y el número de veces que se superó un umbral de 40 mm, seleccionado de acuerdo al análisis de los datos históricos de precipitación máxima registrada en 24 horas; para los periodos 1975-2000 y 2070-2099 en la Cuenca del Bajo Magdalena, bajo el escenario A2. Es importante resaltar que en este caso se observa una clara tendencia de la disminución de eventos extremos para el periodo 2070-2099.



**Figura 9.** Número de veces que se rebasa un umbral de 40 mm, periodo 1975-2000 y 2070-2099, Bajo Magdalena.

Al comparar la incidencia de los escenarios A2 y B2 para el periodo 2070-2099, no se observan diferencias significativas, es decir ambos escenarios proyectan similar comportamiento. El **ANEXO VII** presenta otras comparaciones graficas importantes de las variables para diferentes periodos, entre e intra escenarios en ambas cuencas y la tendencia actual para la precipitación y la temperatura máxima en la cuenca del Sinú-Caribe, teniendo en cuenta el promedio de las variables (línea base) desde 1964 a 1990.

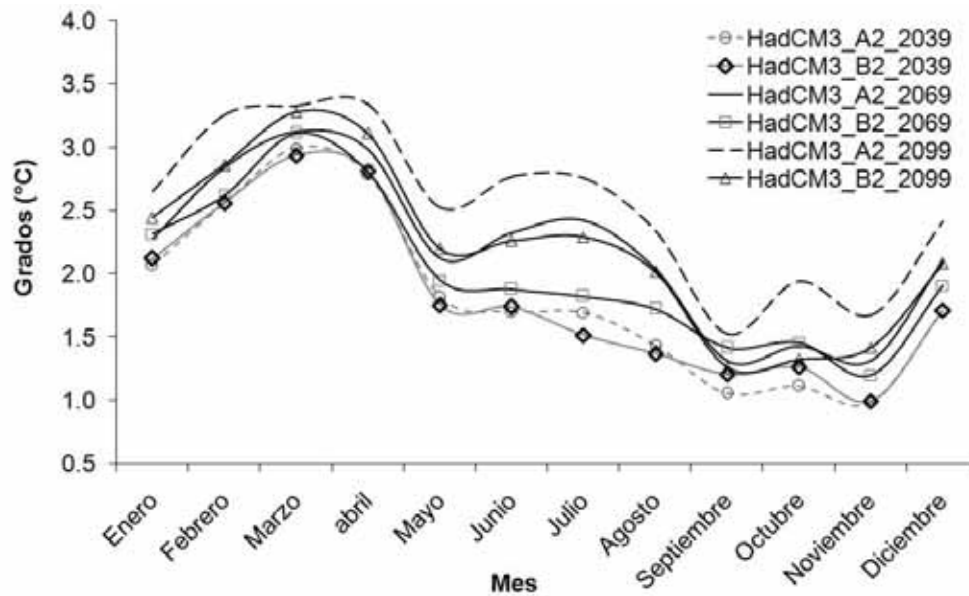
Con respecto a la temperatura, la **Figura 10**, muestra las anomalías de la temperatura máxima proyectada para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, usando los datos de temperatura media en superficie y humedad relativa del reanálisis (CNEP) en la celda de estudio; las diferencias entre la proyecciones de los escenarios A2 y B2 para el año 2039 son relativamente pequeñas o insignificantes, unas pocas décimas de grados en algunos meses. Al comparar estas curvas con las del 2069, se observa que el escenario B2 proyecta pequeños aumentos que van desde 0 a 0.4 °C, mientras que el A2 indica aumentos en un rango de 0.1 a 0.7 °C, diferencias que se hacen mas evidentes a partir junio.

De otro lado al analizar las curvas para el periodo 2099 respecto al 2069, se observa que el escenario A2 (proyectado al 2069) casi se superpone con la curva del escenario B2 (proyectada al 2099), sugiriendo un aumento aproximado de 0.22°C por cada 30 años de análisis en B2, mientras que el escenario A2 presenta incrementos de 0.33°C, alcanzando un aumento aproximado de la variable al final del periodo de 0.66 °C y 1.0 °C respectivamente (**Tabla 4**).

Lo anterior resalta la importancia de las políticas, estrategias y medidas que se adopten desde todos los sectores productivos y económicos, así como en el avance de nuevas tecnologías y la construcción de una nueva cultura, con el propósito de disminuir las emisiones de gases de efecto de invernadero.

**Tabla 4.** Anomalías de temperatura máxima (°C) Cuenca del Bajo Magdalena.

Mes/Periodo	Actual	2039-A2	2039-B2	2069-A2	2069-B2	2099-A2	2099-B2
Enero	1.9	2.1	2.1	2.3	2.3	2.6	2.4
Febrero	2.3	2.6	2.6	2.8	2.6	3.3	2.9
Marzo	2.8	3.0	2.9	3.1	3.1	3.3	3.3
abril	2.5	2.8	2.8	3.0	2.8	3.3	3.1
Mayo	1.5	1.8	1.8	2.1	2.0	2.5	2.2
Junio	1.3	1.7	1.7	2.3	1.9	2.8	2.3
Julio	1.3	1.7	1.5	2.4	1.8	2.8	2.3
Agosto	1.1	1.4	1.4	2.0	1.7	2.3	2.0
Septiembre	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.3
Octubre	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.9	1.3
Noviembre	0.7	1.0	1.0	1.3	1.2	1.7	1.4
Diciembre	1.5	1.7	1.7	2.1	1.9	2.4	2.1
<b>Promedio</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>2.2</b>



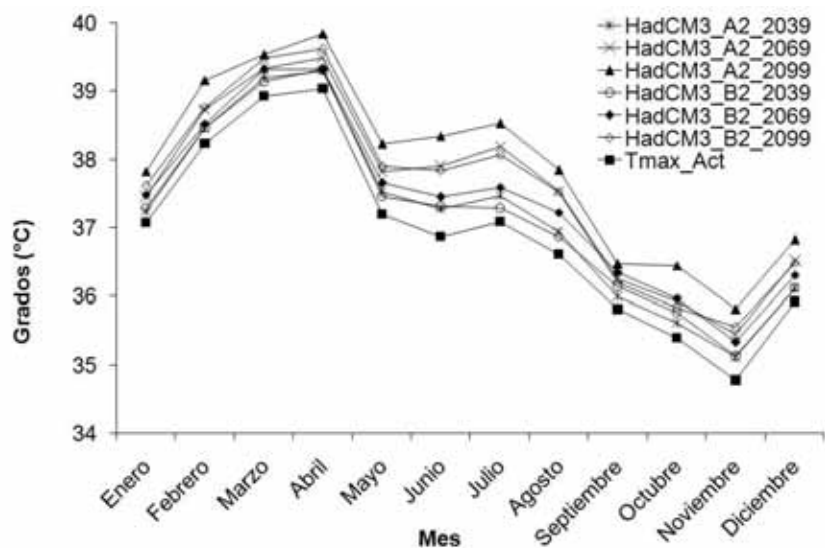
**Figura 10.** Escenarios de anomalías de temperatura máxima, utilizando HadCM3, A2 y B2

Es importante anotar que al estimar la temperatura máxima actual directamente con el SDSM, teniendo en cuenta los datos del HadCM3 bajo los escenarios (A2 y B2) en las estaciones 2903511 y 2906503 con una deficiente base de datos, se encuentra una subestimación con relación a los observados medios mensuales pero al sumar las anomalías actuales estimadas y al realizar las comparaciones de esta nueva temperatura ajustada y los observados, no se encuentran diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confiabilidad del 95% (**ANEXO VI\_A**); lo anterior indica que, estas están muy bien estimadas a partir del modelo calibrado y sugiere a la vez la utilización de los observados como punto de partida.

Teniendo en cuenta el promedio mensual de la temperatura máxima de las tres estaciones evaluadas en el periodo 1990-2004 y los valores de las anomalías de dicha variable, logrados mediante las salidas del modelo HadCM3 para los escenarios A2 y B2, es posible proyectar y analizar el comportamiento de la temperatura máxima esperada para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

La **Figura 11** y la **Tabla 5** presentan la comparación de la temperatura máxima bajo los escenarios mencionados y la observada, en ambos casos se presenta un aumento de la variable en los diferentes meses del año que va de 0.6 a 1.5 °C en el escenario A2 para todo el periodo y de 0.4 a 1.0 °C en el escenario B2.





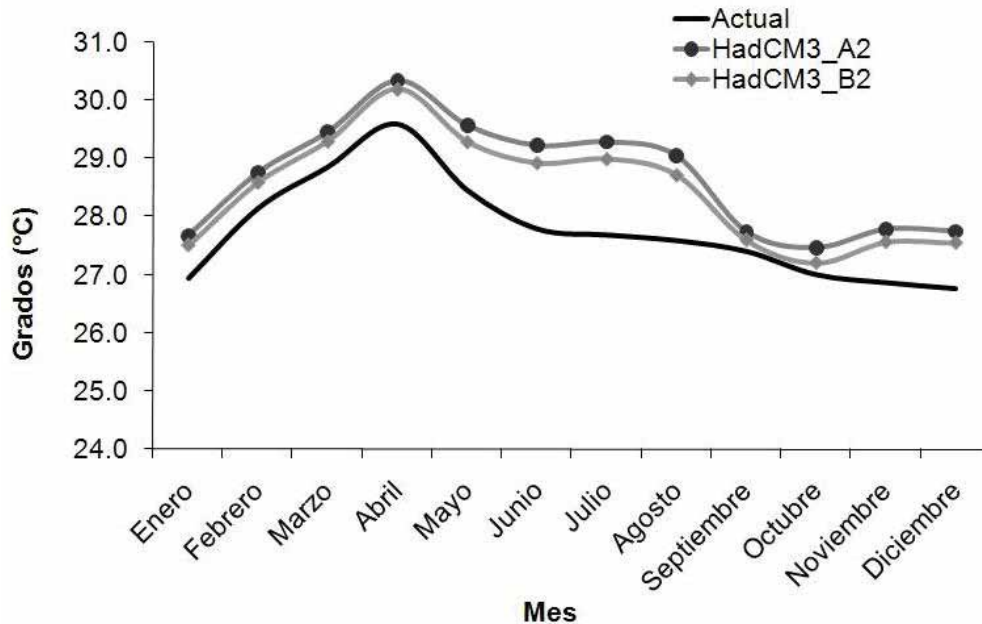
**Figura 11.** Comparación temperatura máxima esperada, proyecciones HadCM3, escenario A2 y B2.

**Tabla 5.** Temperatura máxima actual y proyectada Cuenca del Bajo Magdalena.

Mes/Periodo	Actual	2039_A2	2069_A2	2099_A2	2039_B2	2069_B2	2099_B2
Enero	37.1	37.2	37.4	37.8	37.3	37.5	37.6
Febrero	38.2	38.5	38.7	39.2	38.5	38.5	38.8
Marzo	38.9	39.2	39.3	39.5	39.1	39.3	39.5
Abril	39.0	39.3	39.5	39.8	39.3	39.3	39.6
Mayo	37.2	37.5	37.8	38.2	37.5	37.7	37.9
Junio	36.9	37.3	37.9	38.3	37.3	37.4	37.8
Julio	37.1	37.5	38.2	38.5	37.3	37.6	38.1
Agosto	36.6	36.9	37.5	37.8	36.9	37.2	37.5
Septiembre	35.8	36.0	36.2	36.5	36.1	36.4	36.2
Octubre	35.4	35.6	35.9	36.4	35.8	36.0	35.8
Noviembre	34.8	35.1	35.5	35.8	35.1	35.3	35.6
Diciembre	35.9	36.1	36.5	36.8	36.1	36.3	36.5

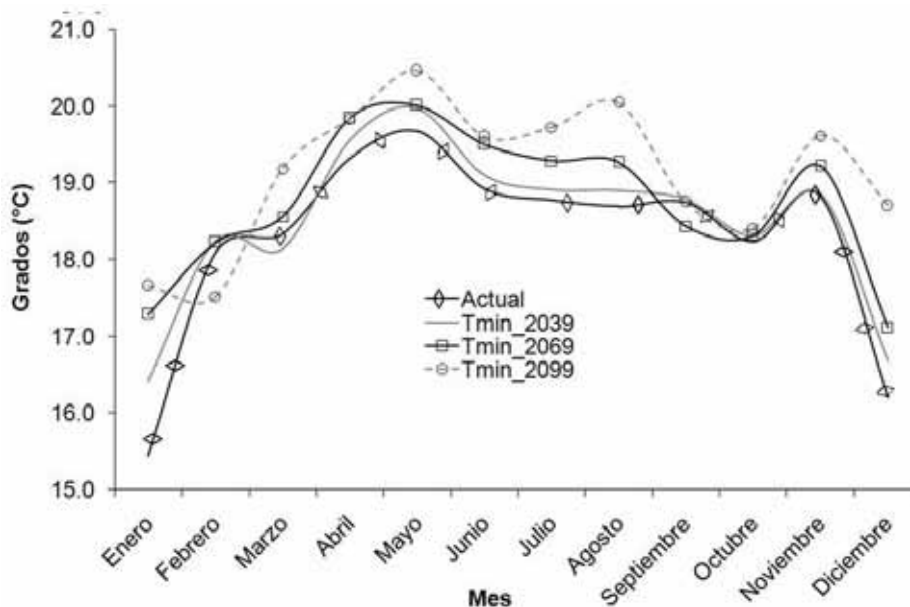
Al comparar la temperatura media actual u observada (1990-2004) y las curvas para las proyecciones del periodo 2070-2099 bajo los escenarios A2 y B2, se evidencia un aumento que puede ir de 0.2°C a 1.3°C en B2 y de 0.3 a 1.6°C en A2, estableciendo un nuevo patrón de esta variable en la región de estudio. El escenario A2 proyecta mayores incrementos, siendo la

diferencia entre las curvas de los escenarios para el periodo de análisis hasta de 0.3°C en algunos trayectos. (*Figura 12*).



*Figura 12.* Proyección temperatura media, periodo 2070-2099, escenarios A2 y B2

Para la temperatura mínima, se encuentra que ésta tiende a subir a lo largo del año en ambos escenarios, excepto en algunos meses donde se proyectan aumentos en la temperatura máxima y reducciones relevantes en la precipitación (septiembre, octubre, febrero, marzo), donde las temperaturas mínimas son muy similares e incluso menores a la actual. (Ver *Figura 8*, *Figura 11* y *Figura 13*).



**Figura 13.** Proyección temperatura mínima, HadCM3\_A2, todos los periodos.

Los aumentos en temperatura, se presentan en este caso, con disminución en la cantidad de lluvia precipitada en el área de estudio, lo que agudiza la condición hídrica deficitaria dominante en ella. Este aspecto será estudiado más adelante en el análisis de balance hídrico.

#### **4.3. Proyecciones cuenca del Sinú\_Caribe.**

Similar procedimiento al anterior se realizó para la Cuenca del Sinú-Caribe, ubicada en la celda 7.5°N-75°W, donde se analizaron las estaciones 1307502 y 2502524.

En la **Tabla 6** se encuentra la precipitación actual y proyectada (mm) para todos los periodos en esta región.

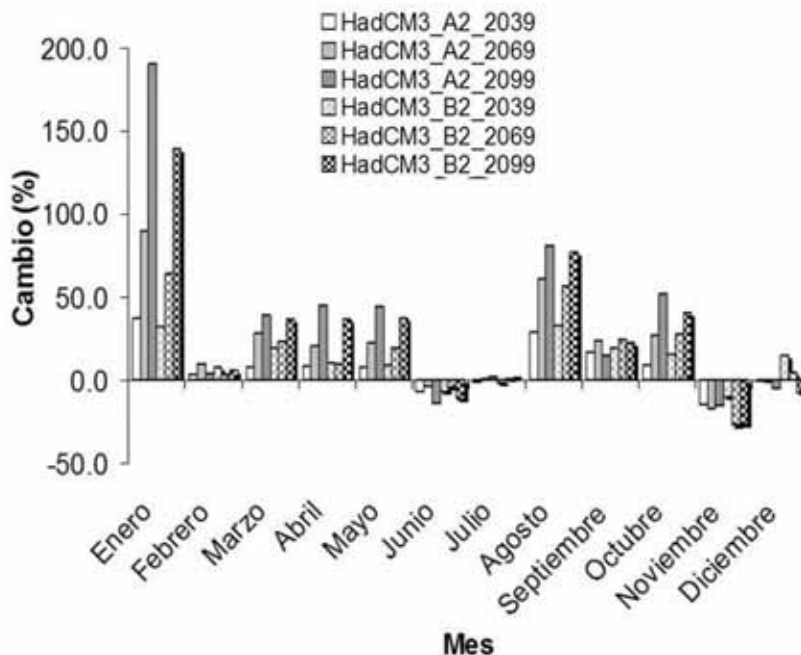
**Tabla 6.** Precipitación actual y proyectada Cuenca del Sinú\_Caribe.

Mes	Actual	2039-A2	2069-A2	2099-A2	2039-B2	2069-B2	2099-B2
Enero	17.6	24.2	33.5	51.2	23.4	28.9	42.2
Febrero	18.7	19.4	20.6	19.5	20.2	19.4	19.8
Marzo	51.8	55.9	66.4	72.0	61.8	63.9	70.6
Abril	131.5	142.8	158.7	190.9	144.9	144.8	179.4
Mayo	324.9	350.3	398.1	468.6	353.6	389.3	446.7
Junio	250.3	233.2	240.7	215.1	233.6	240.1	222.5
Julio	232.1	229.9	234.5	237.6	228.4	233.6	235.1
Agosto	322.7	415.9	519.2	584.5	429.8	505.3	571.3
Septiembre	215.6	252.9	267.4	248.4	257.2	269.6	264.1
Octubre	349.3	381.6	443.5	531.6	403.4	446.0	491.6
Noviembre	178.6	152.7	148.0	151.4	160.6	130.7	130.8
Diciembre	119.0	118.5	117.7	113.4	136.5	124.9	110.1
<b>Total</b>	<b>2212.0</b>	<b>2377.1</b>	<b>2648.5</b>	<b>2884.3</b>	<b>2453.3</b>	<b>2596.5</b>	<b>2784.4</b>

La *Tabla 7* y *Figura 14* muestran los porcentajes de cambio en la precipitación proyectada para ambos escenarios en esta Cuenca. Se puede observar que para todos los periodos se proyectan los mayores aumentos de enero a mayo y de agosto a octubre. Al analizar la precipitación acumulada anual, se encuentra un aumento para todas las proyecciones bajo los dos escenarios.

**Tabla 7.** Aumento y/o disminución de la precipitación en % Cuenca Sinú-Caribe

Mes	39-A2	69-A2	99-A2	39-B2	69-B2	99-B2
Enero	37.1	90.1	190.3	32.4	64.1	139.5
Febrero	3.4	10.1	3.9	7.7	3.6	5.9
Marzo	7.9	28.2	39.2	19.3	23.4	36.4
Abril	8.6	20.8	45.2	10.2	10.1	36.5
Mayo	7.8	22.5	44.2	8.8	19.8	37.5
Junio	-6.8	-3.8	-14.0	-6.7	-4.1	-11.1
Julio	-0.9	1.1	2.4	-1.6	0.7	1.3
Agosto	28.9	60.9	81.1	33.2	56.6	77.0
Septiembre	17.3	24.0	15.2	19.3	25.0	22.5
Octubre	9.2	26.9	52.2	15.5	27.7	40.7
Noviembre	-14.5	-17.1	-15.2	-10.1	-26.8	-26.8
Diciembre	-0.4	-1.0	-4.7	14.7	5.0	-7.5
<b>Anual</b>	<b>7.5</b>	<b>19.7</b>	<b>30.4</b>	<b>10.9</b>	<b>17.4</b>	<b>25.9</b>



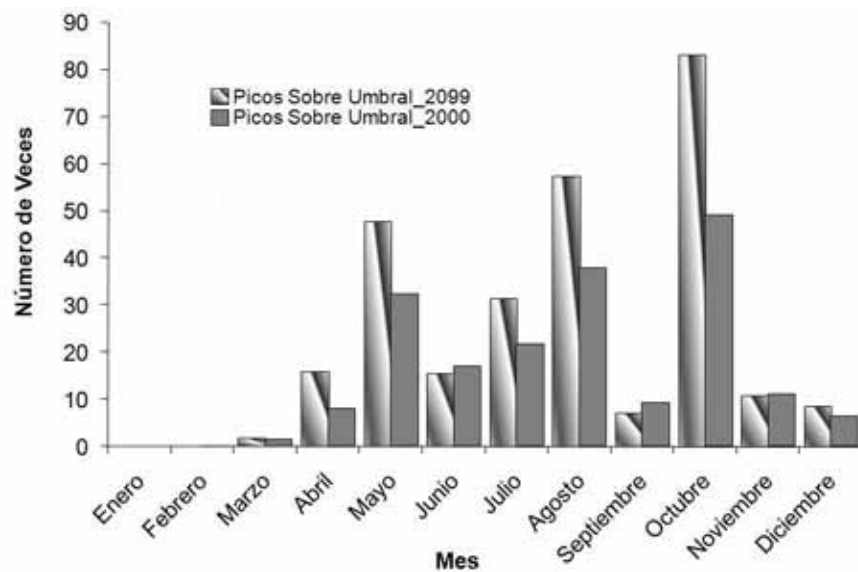
**Figura 14.** Escenarios de anomalías de la precipitación acumulada mensual, Cuenca del Sinú-Caribe.

Como se puede observar, la precipitación en esta región tiende a aumentar de manera notoria en todos los periodos de análisis y en casi todos los meses del año, exceptuando Junio, Julio, Noviembre y Diciembre, en los que se observa una pequeña disminución. Comparando los escenarios A2 y B2, se encuentra que las proyecciones son muy similares, mostrando pequeñas diferencias entre ambos, siendo un poco más influyente el escenario A2.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, Bernal (2001), mediante el método de reducción de escala (relaciones canónicas) y usando los valores de salida del modelo de circulación general Community Climate Model (CCM3) asumiendo duplicación de  $\text{CO}_2$ , estima los cambios en los valores anuales de precipitación para cada una de las 24 regiones en Colombia; dicho autor concluye que en la Región Sinú se proyectan aumentos en la

precipitación hasta del 41%; mientras que en el Bajo Magdalena se esperan disminuciones del 50%. Por otra parte al analizar los datos proyectados por el modelo Japonés MRI/JMA que tiene una resolución de 20 Km y considera el escenario A1B de emisiones de gases de efecto de invernadero, para finales del siglo, se tiene que el modelo predice aumentos de 47.5% en la Cuenca del Sinú-Caribe y disminuciones de 6.8% en el Bajo Magdalena.

La cuenca del Sinú-Caribe presenta mayores precipitaciones y proyecta aumentos significativos de ésta, contrario a la Cuenca del Bajo Magdalena, por tal motivo y por el análisis hecho a los datos históricos sobre lluvias máximas en 24 horas, se determino el valor de 50 mm de precipitación como un umbral importante a tener en cuenta. Al comparar el número de veces que se sobrepasa el valor umbral para el periodo 1975-2000 y 2070-2099 (escenario A2), se observa un incremento importante de estos eventos en el último periodo. (*Figura 15*).



*Figura 15.* Número de veces que se rebasa un umbral de 50 mm, periodo 1975-2000 y 2070-2099, Sinú\_Caribe.

Los escenarios A2 y B2, proyectan similares incrementos de estos eventos para el periodo 2070-2099 (**ANEXO VII**).

La **Figura 16** y **Tabla 8**, presentan las anomalías de temperatura máxima proyectada para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, usando los datos de temperatura media en superficie, humedad relativa y humedad específica del reanálisis (CNEP). Las diferencias entre las proyecciones de los escenarios A2 y B2 para el año 2039 son relativamente pequeñas o insignificantes, pocas décimas de grado, en algunos meses. Al comparar estas curvas con las del 2069, se observa que el escenario B2 proyecta aumentos que van desde 0.21 a 0.64 °C, mientras que el A2 indica aumentos en un rango de 0.41 a 1.61 °C.

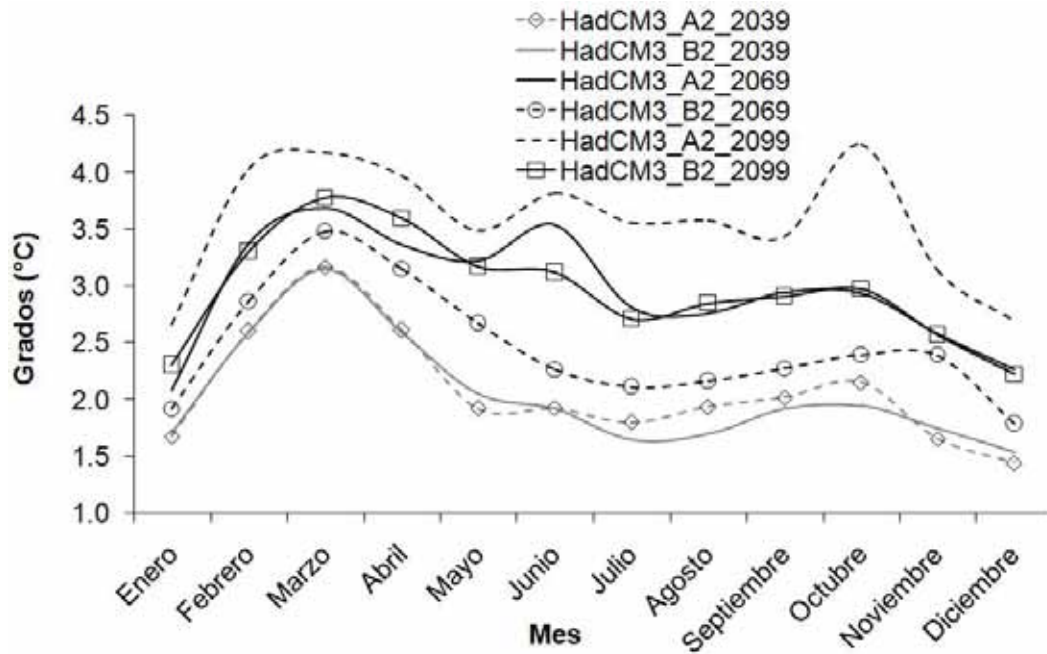
Al analizar las curvas para el periodo 2099 respecto al 2069, se observa que el escenario A2 (proyectado al 2069) casi se superpone con la curva del escenario B2 (proyectada al 2099), sugiriendo un aumento aproximado de 0.43°C por cada 30 años de análisis en B2, mientras que el escenario A2 presenta incrementos de 0.63°C, alcanzando un aumento aproximado de la variable al final del periodo de 1.30 °C y 1.91 °C respectivamente.

Igual que en la Cuenca del Bajo Magdalena se resalta nuevamente la importancia que tienen las políticas, estrategias y medidas que se adopten desde todos los sectores productivos y económicos, así como en el avance de nuevas tecnologías y la construcción de una nueva cultura, con el propósito de disminuir las emisiones de gases de efecto de invernadero. También es importante anotar que ambos escenarios predicen mayor aumento de la

temperatura máxima en la Cuenca del Sinú-Caribe que las proyectadas para el Bajo Magdalena, en todos los periodos del análisis.

**Tabla 8.** Anomalías de temperatura máxima (°C) Cuenca del Sinú\_Caribe.

Mes/Periodo	Actual	39-A2	69-A2	99-A2	39-B2	69-B2	99-B2
Enero	1.3	1.7	2.1	2.7	1.7	1.9	2.3
Febrero	2.5	2.6	3.4	4.0	2.6	2.9	3.3
Marzo	2.8	3.2	3.7	4.2	3.1	3.5	3.8
Abril	2.2	2.6	3.4	4.0	2.6	3.1	3.6
Mayo	1.5	1.9	3.2	3.5	2.1	2.7	3.2
Junio	1.4	1.9	3.5	3.8	1.9	2.3	3.1
Julio	1.3	1.8	2.8	3.6	1.6	2.1	2.7
Agosto	1.3	1.9	2.8	3.6	1.7	2.2	2.8
Septiembre	1.4	2.0	2.9	3.4	1.9	2.3	2.9
Octubre	1.7	2.2	2.9	4.2	1.9	2.4	3.0
Noviembre	1.5	1.7	2.6	3.1	1.8	2.4	2.6
Diciembre	1.0	1.4	2.3	2.7	1.5	1.8	2.2
<b>Promedio</b>	<b>1.7</b>	<b>2.1</b>	<b>3.0</b>	<b>3.6</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>3.0</b>



**Figura 16.** Escenarios de anomalías de temperatura máxima, utilizando HadCM3, A2 y B2, Cuenca del Sinú-Caribe.

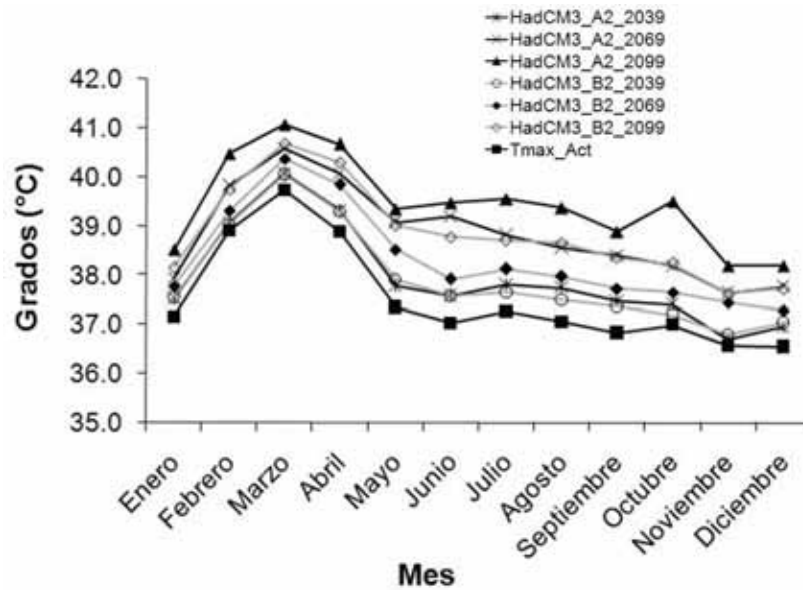


Con el comportamiento de las anomalías relacionadas anteriormente y teniendo en cuenta el promedio histórico mensual de la temperatura máxima de las estaciones, se proyecta y analiza el comportamiento de la temperatura máxima esperada para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099.

La *Tabla 9* y *Figura 17*, comparan la temperatura máxima bajo los escenarios mencionados y la observada. En ambos casos se presenta un aumento de la variable en los diferentes meses del año que va de 1.3 a 2.5 °C en el escenario A2 para todo el periodo y de 0.9 a 1.7 °C en el escenario B2.

**Tabla 9.** *Temperatura máxima actual y proyectada Cuenca del Sinú\_Caribe.*

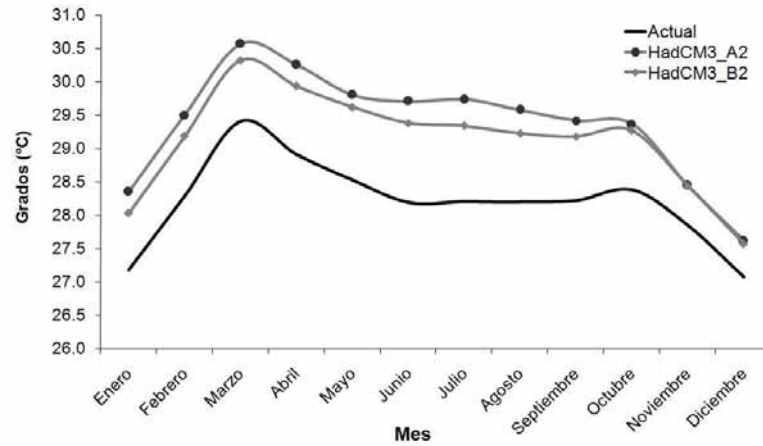
Mes/periodo	Actual	39-A2	69-A2	99-A2	39-B2	69-B2	99-B2
Enero	37.2	37.5	37.9	38.5	37.6	37.8	38.2
Febrero	38.9	39.1	39.8	40.5	39.0	39.3	39.8
Marzo	39.7	40.1	40.6	41.1	40.0	40.4	40.7
Abril	38.9	39.3	40.1	40.7	39.3	39.8	40.3
Mayo	37.3	37.8	39.1	39.3	37.9	38.5	39.0
Junio	37.0	37.6	39.2	39.5	37.6	37.9	38.8
Julio	37.3	37.8	38.8	39.6	37.6	38.1	38.7
Agosto	37.1	37.7	38.6	39.4	37.5	38.0	38.6
Septiembre	36.8	37.5	38.4	38.9	37.4	37.7	38.4
Octubre	37.0	37.4	38.2	39.5	37.2	37.6	38.2
Noviembre	36.6	36.7	37.6	38.2	36.8	37.4	37.6
Diciembre	36.5	36.9	37.8	38.2	37.0	37.3	37.7



**Figura 17.** Comparación temperatura máxima esperada, proyecciones HadCM3, escenarios A2 y B2. Cuenca Sinú-Caribe

Comparando las temperaturas máximas para el periodo 2070-2099; el escenario A2 predice mayores incrementos con relación al B2, que van de 0.3°C (en Mayo) hasta 1.3°C (en Octubre), las diferencias se hacen mas evidentes a partir del mes de Mayo. (ANEXO VII).

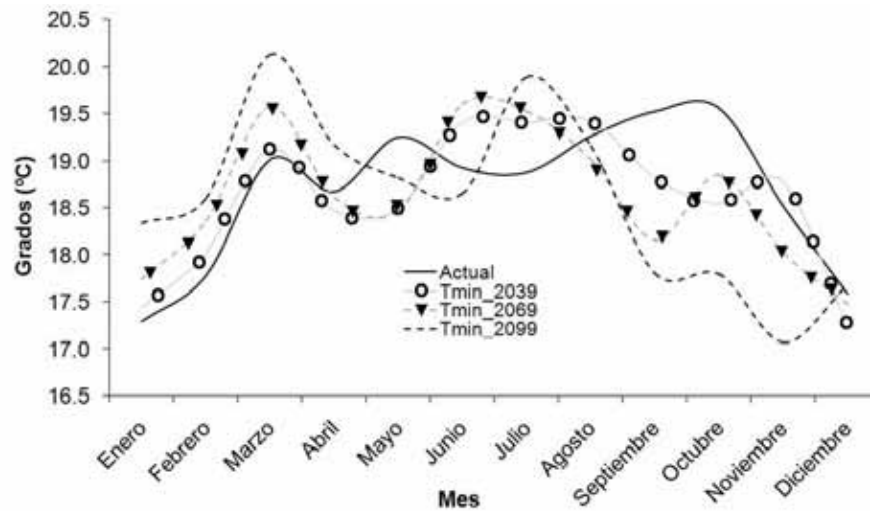
Los cambios en las temperaturas máximas y mínimas, podrían establecer al futuro un nuevo patrón de temperatura media en el área de estudio, convirtiéndose en un parámetro igualmente importante para generar estrategias de adaptación, planificación y manejo de la cuenca. Al comparar la temperatura media actual y las predicciones para el periodo 2070-2099, se evidencia un aumento que puede ir de 0.5°C a 1.2°C en B2 y de 0.5 a 1.5°C en A2, este escenario proyecta mayores incrementos, la diferencia entre las curvas de los escenarios para el periodo de análisis alcanza hasta los 0.4°C en algunos trayectos. (Figura 18).



**Figura 18.** Proyección temperatura media, periodo 2070-2099, escenarios A2 y B2. Cuenca Sinú-Caribe

En la **Figura 19**, se observa claramente que en el primer semestre del año la temperatura mínima proyectada tiende a estar por encima de la actual, es decir a aumentar; al hacer un análisis conjunto de las variables, se tiene que para este periodo se predicen aumentos en la temperatura máxima y en la precipitación, lo cual puede generar una mayor nubosidad en el día induciendo un efecto de invernadero en la noche, máxime cuando la radiación solar es mas directa (perpendicular) sobre la región, dado por el desplazamiento aparente del sol en esta época del año; caso contrario ocurre después de la mitad del mes de Agosto donde igualmente se proyectan aumentos en la temperatura máxima y en la precipitación, pero disminución de la temperatura mínima. Tal efecto puede ser explicado por una menor cantidad de radiación solar entrante a superficie, mayor albedo en su recorrido y una menor nubosidad sobre la región, dado que la posición aparente del sol en esta época se encuentra al sur del área de estudio, llegando los rayos solares a dicha área con un aparente ángulo (oblicuo) relevante. Relacionado al anterior aspecto, el Ideam, (2000), precisa que en la región del Caribe

Colombiano, la radiación solar alcanza sus máximos valores en Junio ( $6.4 \text{ Kwh/m}^2 \cdot \text{día}$ ) y disminuyen gradualmente hasta diciembre ( $5.2 \text{ Kwh/m}^2 \cdot \text{día}$ ).



**Figura 19.** Proyección temperatura mínima, HadCM3\_A2, todos los periodos. Cuenca del Sinú-Caribe.

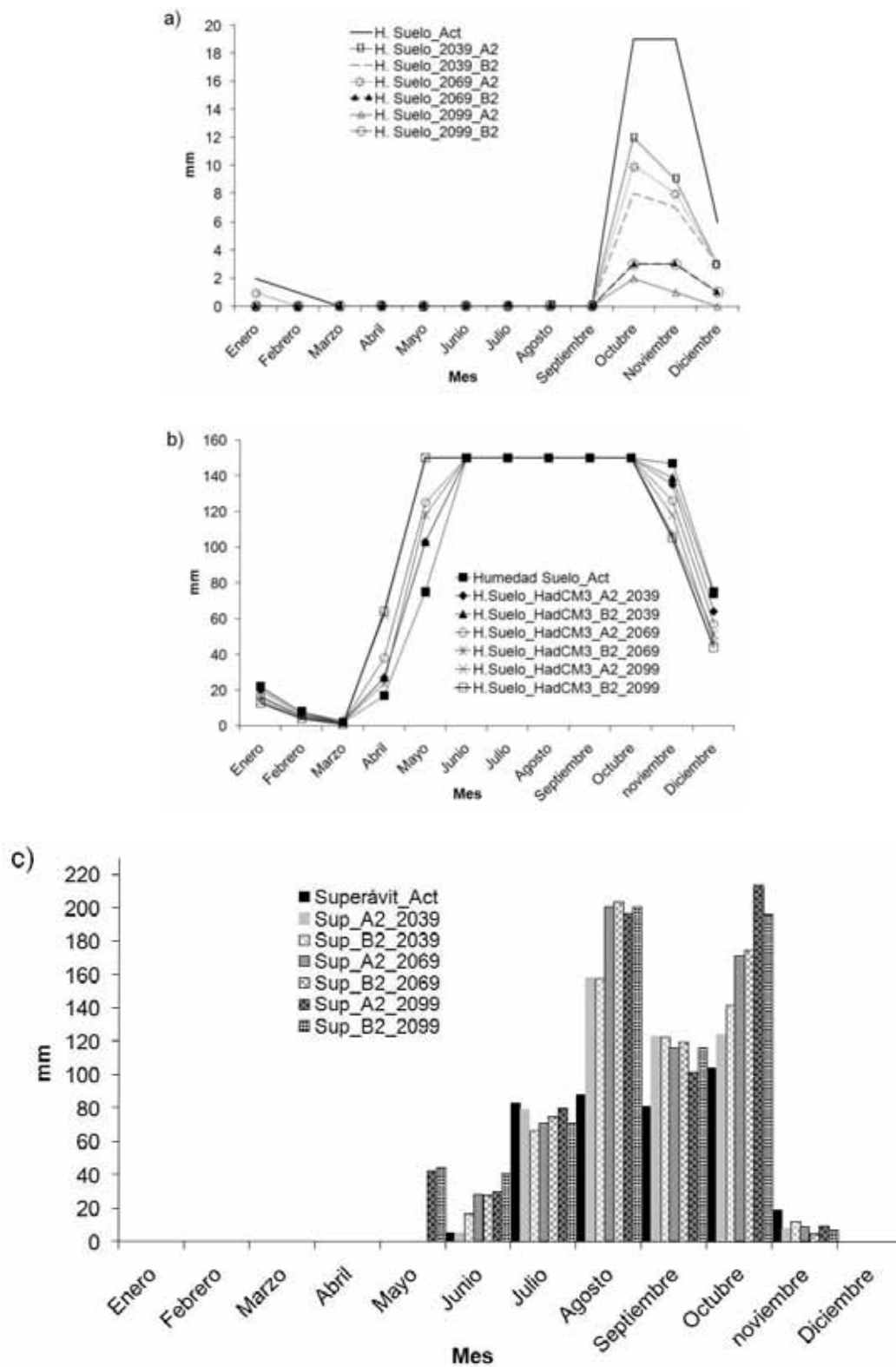
#### 4.4. Balance hídrico.

El anterior análisis permite calcular el balance hídrico actual y proyectado para los diferentes periodos en ambas cuencas, mediante el método modificado de balance hidrológico de *Thornthwaite*, el cual se puede consultar en <http://climate.geog.udel.edu/~wimp/>

Al analizar los resultados, se observa que la cuenca del Bajo Magdalena no presenta superávit de agua en ninguno de los periodos analizados y solo cuenta con algo de humedad en el suelo (teniendo en cuenta el punto de marchites) en algunos meses del año, también es importante resaltar que dicha humedad es mucho más escasa con el transcurso del tiempo, lo

que sugiere, nuevamente, aumentos en temperatura máxima y disminución en precipitación; mientras que la cuenca del Sinú-Caribe presenta humedad del suelo para todos los periodos analizados durante todo el año, siendo menor en el primer trimestre y mucho mayor a partir de mayo donde empiezan a observarse superávits importantes, los cuales van en aumento conforme transcurre el tiempo, esto pone de manifiesto un importante incremento en la precipitación. (*Figuras 20 a, b y c*).

Lo anterior propone que la cuenca del Bajo Magdalena posee unas características particulares de déficit de agua en comparación con la cuenca del Sinú-Caribe.



**Figura 20.** Balance Hídrico. a) Humedad del suelo actual y proyectada, Cuenca del Bajo Magdalena. b) Humedad del suelo. c) superávit actual y proyectado, Cuenca del Sinú-Caribe.

Al estar la Cuenca del Sinú\_Caribe relacionada directamente con la represa Urrá 1, cuyo propósito principal es la generación de energía eléctrica; el análisis se centra en esta región.

#### ***4.5. Estimación del aporte de caudal del Río Sinú a la represa Urrá 1.***

Con las variables analizadas (Tmax., Tmed., Tmin., precipitación acumulada mensual y anual) y utilizando la base de datos de aporte de caudal del Río Sinú a la represa Urrá 1 brindada por ISA, se realizaron varias regresiones múltiples, tomando como variable dependiente el aporte de caudal y las demás como variables independientes. De las regresiones se seleccionó el siguiente modelo:

$$AC = 1913.97 + 0.86078 * PCP - 46.165 * Tmax \quad (4.1)$$

Donde AC es el aporte de caudal mensual en m<sup>3</sup>/s, PCP es la precipitación mensual en mm y Tmax es la temperatura máxima mensual en °C.

El modelo mostró un buen ajuste, encontrando una relación estadísticamente significativa a un nivel de confiabilidad del 99% entre sus variables (**ANEXO VIB**). Se realizaron varias pruebas de comparación entre los valores observados y los estimados con datos pareados y no pareados y pruebas de datos categóricos, y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las medias, desviaciones estándar, medianas y distribución de las muestras a un nivel de confiabilidad del 95% (**ANEXO VIC**). Los valores observados y estimados se presentan en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** *Aporte de caudal observado y estimado al embalse Urrál.*

<b>Mes</b>	<b>Observada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Aport_Est (m<sup>3</sup>/s)</b>
Enero	172.3	213.7
Febrero	131.2	134.2
Marzo	129.4	124.5
Abril	225.7	232.0
Mayo	414.1	469.6
Junio	476.8	419.8
Julio	493.4	393.9
Agosto	452.6	481.0
Septiembre	431.9	399.2
Octubre	461.5	506.9
Noviembre	408.5	379.6
Diciembre	286.2	329.1
<b>Prom</b>	<b>340.3</b>	<b>340.3</b>
<b>Sum</b>	<b>4083.6</b>	<b>4083.4</b>

Se debe resaltar que las variables independientes utilizadas en la corrida del modelo, fueron los valores obtenidos a partir de los datos de salida del GCM y la aplicación del SDSM, lo cual parece indicar nuevamente de forma indirecta que el HadCM3 explica adecuadamente el comportamiento climático en la región de estudio y que el SDSM es una técnica apropiada de reducción de escala.

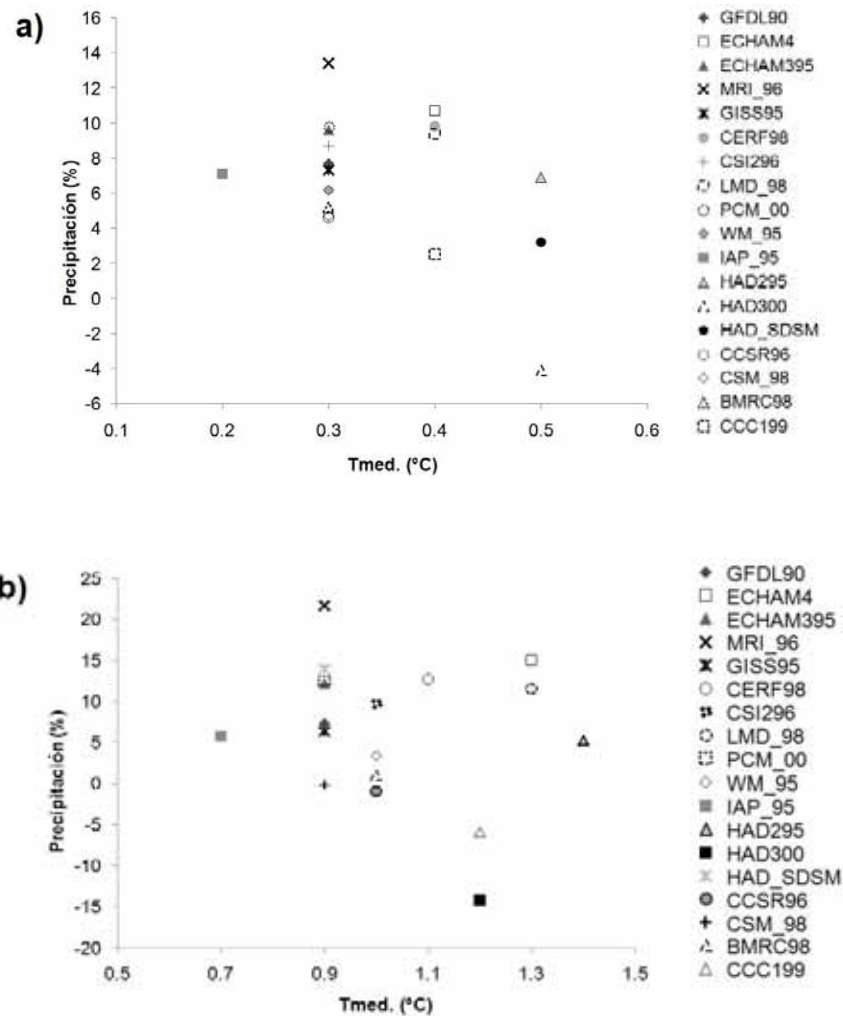
#### **4.6. Comparación de modelos y análisis de sensibilidad del sistema.**

Siguiendo con la metodología descrita, los valores dados por los 17 modelos corridos mediante el programa MAGICC-SCENGEN proyectan aumento en la temperatura media en el área de estudio; en cuanto a la precipitación, se observaron ciertas diferencias, así el 70.6% (12) de los modelos mostraron aumento de la variable conforme transcurre el tiempo; solo el 11.8% (2) proyectan disminuciones en todos los periodos analizados; el 17.6% (3) presenta



cambios que van desde pequeños aumentos al principio, hasta pequeñas disminuciones al final del periodo considerado.

Las **Figuras 21a** y b, se refieren a los diagramas de dispersión de la temperatura media y la precipitación, de acuerdo a los 17 modelos utilizados para el escenario A2 en el área de estudio.

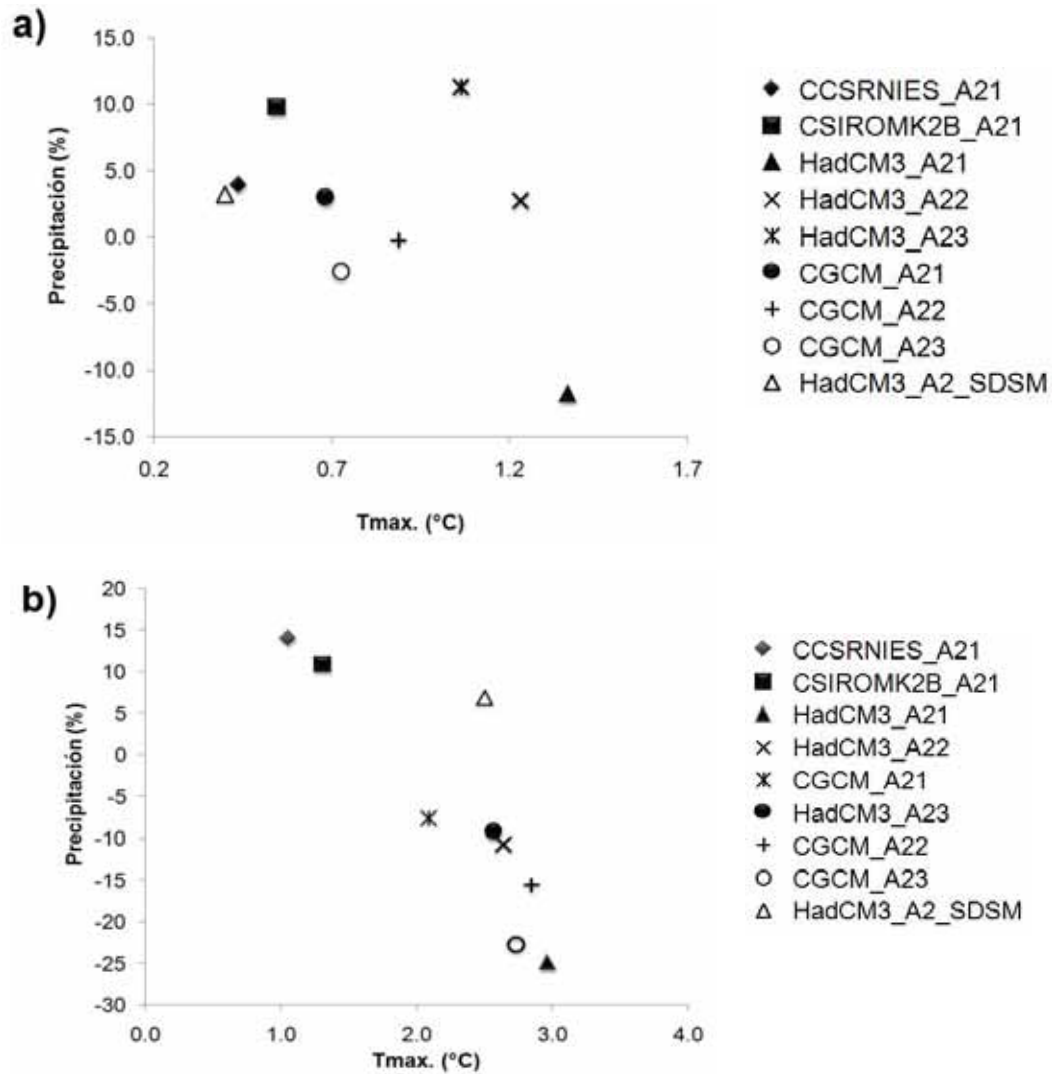


**Figura 21.** Diagrama de dispersión para temperatura media\_precipitación. a) Periodo 2010-2039. b) Periodo 2040-2069.

En las *Figuras 21a* y *b*, se observa la tendencia generalizada al aumento de la temperatura media en todos los periodos analizados; mientras que la precipitación presenta una dispersión cada vez mayor conforme transcurre el tiempo, debido principalmente al número de modelos que proyectan disminución de la variable, aunque en la mayoría de los casos dicha disminución es relativamente pequeña. El escenario denominado HAD\_SDSM, es el resultado de la aplicación de reducción de escala, el cual, como se puede observar en las figuras, se ubica dentro del rango de dispersión de temperatura y precipitación como un escenario razonablemente posible, de acuerdo a la mayoría de los modelos.

Por otro lado se observaron las salidas de los experimentos realizados en el CICS, para los escenarios SRES y las familias de emisiones A2 y B2. Las *Figuras 22a* y *b*, presentan las anomalías de los modelos y experimentos que arrojaron valores para la precipitación y temperatura máxima, debido a que esta última variable presenta el mayor peso para el cálculo de aporte de caudal en la formula (4.1).

Similar al caso anterior la temperatura máxima aumenta en todos los periodos analizados, mientras que la precipitación presenta una dispersión cada vez mayor conforme transcurre el tiempo: para el 2039 el 70% (7) de los experimentos (soluciones) proyectan aumento de la variable; 30% (3), muestran disminución; para los periodos correspondientes a 2069 y 2099, el 40% (4), proyectan aumentos y 60% (6), disminución. El escenario denominado HadCM3\_A2\_SDSM, es el resultado del uso de reducción de escala.



**Figura 22.** Diagrama de dispersión temperatura máxima\_precipitación, escenario A2. a) Período 2010-2039. b) Período 2040-2069.

#### 4.7. Sensibilidad y vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico.

Mediante el uso del Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP), se realizaron varios experimentos de sensibilidad para la generación eléctrica, de acuerdo a los cambios de aporte de caudal a la represa Urrá 1, calculados con la fórmula (4.1), y con los

datos provenientes de los diferentes escenarios climáticos (Tmax y PCP), determinados anteriormente.

Además se introduce la variable evaporación neta (evaporación-precipitación), para lo cual se calculó la evaporación anual en sitio de presa, mediante la expresión  $75 \cdot T_{med}$ , propuesta por Visentini (1937), la cual según el autor es una buena aproximación para cuerpos de agua en cotas inferiores a 200 msnm, y posteriormente se distribuyó mes a mes de acuerdo al porcentaje de horas de insolación mensual que se registran en esta latitud (Ver **Tabla 11**).

La **Tabla 12**, presenta las proyecciones de generación hidroeléctrica, volumen almacenado en presa y sus variables relacionadas para los diferentes experimentos, bajo los escenarios A2, periodo 2010-2039.

**Tabla 11.** *Calculo de evaporación neta diferentes modelos y experimentos, periodo 2010-1039*

Mes/Exp	Actual			CCSRNIES_39A21			CSIROMK2B_39A21			CGCM2_39A21			CGCM2_39A22		
	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn
Enero	17.6	171.9	154.3	21.4	176.2	154.8	16.9	176.2	159.3	19.1	176.2	157.15	19.2	177.4	158.2
Febrero	18.7	158.0	139.3	19.9	161.9	142.0	27.1	161.9	134.8	26.0	161.9	135.96	17.5	163.0	145.5
Marzo	51.8	178.7	126.9	62.7	183.2	120.5	43.7	183.2	139.5	48.4	183.2	134.72	64.8	184.4	119.7
Abril	131.5	177.0	45.5	128.5	181.4	52.9	139.3	181.4	42.1	111.1	181.4	70.29	127.4	182.7	55.2
Mayo	324.9	186.3	-138.6	318.5	191.0	-127.5	338.0	191.0	-147.1	221.2	191.0	-30.22	360.1	192.3	-167.8
Junio	250.3	181.9	-68.4	248.5	186.4	-62.1	325.8	186.4	-139.4	266.3	186.4	-79.89	246.9	187.7	-59.2
Julio	232.1	187.4	-44.7	238.9	192.0	-46.9	301.1	192.0	-109.0	220.0	192.0	-27.96	217.1	193.4	-23.7
Agosto	322.7	184.2	-138.5	315.8	188.8	-127.0	384.6	188.8	-195.8	287.6	188.8	-98.85	277.0	190.1	-86.9
Septiembre	215.6	174.5	-41.1	215.2	178.8	-36.4	234.5	178.8	-55.7	205.2	178.8	-26.34	234.7	180.1	-54.7
Octubre	349.3	176.4	-172.9	347.8	180.8	-167.0	375.1	180.8	-194.4	271.0	180.8	-90.23	301.2	182.0	-119.1
Noviembre	178.6	167.3	-11.3	171.8	171.4	-0.4	203.0	171.4	-31.5	256.2	171.4	-84.74	193.6	172.6	-20.9
Diciembre	119	171.3	52.3	126.6	175.6	49.0	121.7	175.6	53.9	161.7	175.6	13.86	94.9	176.8	81.9
<b>Total</b>	<b>2212</b>	<b>2115.0</b>	<b>-97.0</b>	<b>2215.5</b>	<b>2167.5</b>	<b>-48.0</b>	<b>2510.6</b>	<b>2167.5</b>	<b>-343.1</b>	<b>2093.7</b>	<b>2167.5</b>	<b>73.76</b>	<b>2154.4</b>	<b>2182.5</b>	<b>28.1</b>

Mes/Exp	HadCM3_39A21			HadCM3_39A22			HadCM3_39A23			HadCM3_A2_SDSM			Porc-Insol
	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	PCP	Evp	Evpn	
Enero	11.7	181.7	170.0	94.2	181.1	86.9	26.7	180.5	153.8	24.2	173.8	149.6	8.13
Febrero	6.6	167.0	160.3	4.8	166.4	161.6	147.7	165.8	18.2	19.4	159.7	140.3	7.47
Marzo	58.6	188.9	130.3	110.7	188.2	77.6	50.8	187.6	136.8	55.9	180.6	124.8	8.45
Abril	92.5	187.1	94.5	145.8	186.4	40.6	114.3	185.8	71.5	142.8	178.9	36.1	8.37
Mayo	293.3	196.9	-96.4	402.0	196.2	-205.7	294.6	195.6	-99.1	350.3	188.3	-162.0	8.81
Junio	215.3	192.2	-23.1	219.2	191.6	-27.6	240.8	190.9	-49.9	233.2	183.8	-49.4	8.6
Julio	196.7	198.0	1.3	220.9	197.4	-23.5	233.3	196.7	-36.6	229.9	189.4	-40.5	8.86
Agosto	241.7	194.7	-47.0	286.9	194.0	-92.9	279.5	193.4	-86.1	415.9	186.2	-229.8	8.71
Septiembre	139.0	184.4	45.4	167.5	183.8	16.3	173.3	183.2	9.8	252.9	176.3	-76.5	8.25
Octubre	275.1	186.4	-88.7	230.6	185.8	-44.9	310.3	185.1	-125.1	381.6	178.3	-203.3	8.34
Noviembre	199.4	176.8	-22.6	106.0	176.2	70.2	179.3	175.6	-3.7	152.7	169.1	16.4	7.91
Diciembre	18.0	181.0	163.0	87.5	180.4	93.0	372.8	179.8	-193.0	118.5	173.1	54.6	8.1
<b>Total</b>	<b>1747.9</b>	<b>2235.0</b>	<b>487.1</b>	<b>2076.1</b>	<b>2227.5</b>	<b>151.4</b>	<b>2423.5</b>	<b>2220.0</b>	<b>-203.5</b>	<b>2377.1</b>	<b>2137.5</b>	<b>-239.6</b>	<b>100</b>

**Tabla 12.** Cálculo de generación hidroeléctrica y sus variables relacionadas de acuerdo a las proyecciones de los diferentes modelos  
Periodo 2010-2039. Escenarios A2

<i>Mes/Exp.</i>	<i>CGCM2_A21</i>					<i>CGCM2_A22</i>					<i>CGCM2_A23</i>				
	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>
Enero	37.4	19.1	203.9	1415.9	116.2	38.3	19.2	160.7	1292.1	101.7	38.2	14.2	162.0	1299.9	102.4
Febrero	38.7	26.0	151.4	1245.1	87.7	40.0	17.5	80.2	1022.8	69.9	40.0	18.4	82.2	1031.5	70.6
Marzo	39.6	48.4	127.8	1055.9	79.8	40.7	64.8	89.8	843.7	2.4	40.9	67.2	83.0	837.7	2.4
Abril	39.0	111.1	207.9	1076.9	77.6	39.3	127.4	210.0	938.4	4.6	39.6	125.8	192.0	903.8	2.5
Mayo	39.0	221.2	303.2	1204.5	106.6	38.0	360.1	470.4	1475.8	112.5	37.5	340.5	477.1	1463.5	111.2
Junio	38.4	266.3	371.8	1316.8	128.4	37.8	246.9	380.6	1464.1	132.7	37.5	243.7	393.4	1482.1	132.8
Julio	38.4	220.0	332.2	1269.6	133.3	38.0	217.1	348.0	1368.0	136.0	37.7	241.1	380.1	1437.8	136.9
Agosto	38.4	287.6	389.9	1418.3	134.4	37.9	277.0	401.1	1488.1	136.3	37.7	310.8	439.1	1598.2	138.2
Septiembre	37.8	205.2	346.9	1435.7	131.8	37.8	234.7	372.4	1522.8	133.5	37.5	230.7	382.1	1598.0	135.4
Octubre	37.8	271.0	402.9	1510.4	137.2	37.9	301.2	424.3	1595.3	139.1	37.6	300.4	434.9	1630.0	140.3
Noviembre	37.2	256.2	417.2	1630.0	134.8	37.6	193.6	345.9	1563.5	135.0	37.4	150.1	317.5	1522.2	135.0
Diciembre	37.0	161.7	347.2	1629.1	140.3	37.6	94.9	258.0	<b>1507.3</b>	121.1	37.3	100.8	278.9	1516.3	121.5
<b>Total</b>					<b>1408.2</b>					<b>1224.8</b>					<b>1229.2</b>

<i>Mes/Exp.</i>	<i>HadCM3_A21</i>					<i>HadCM3_A22</i>					<i>HadCM3_A23</i>				
	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m³/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidro (GWh)</b>
Enero	38.5	11.7	144.7	1025.6	76.8	38.4	94.2	221.7	1148.6	86.7	38.3	26.7	169.5	1386.3	110.9
Febrero	39.9	6.6	75.9	833.1	4.9	40.0	4.8	70.1	906.3	5.1	39.8	147.7	205.1	1297.3	91.3
Marzo	40.7	58.6	85.2	708.2	2.4	40.5	110.7	138.0	850.9	4.8	40.6	50.8	82.5	1012.2	76.5
Abril	40.3	92.5	131.4	712.6	2.5	39.8	145.8	201.5	929.5	4.8	40.1	114.3	160.7	968.2	68.7
Mayo	38.8	293.3	373.6	1152.9	83.4	37.8	402.0	515.9	1550.3	118.8	38.6	294.6	383.7	1316.0	105.3
Junio	38.7	215.3	313.5	1179.8	121.8	38.4	219.2	328.0	1399.8	132.8	38.4	240.8	347.8	1324.6	129.6
Julio	39.3	196.7	266.3	1080.5	124.8	38.7	220.9	315.3	1276.5	134.3	38.4	233.3	341.2	1290.5	133.7
Agosto	39.7	241.7	286.2	1120.0	111.5	39.2	286.9	352.0	1347.1	133.7	38.9	279.5	359.9	1369.1	134.1
Septiembre	40.0	139.0	184.3	959.0	97.3	39.2	167.5	250.0	1205.8	124.1	39.0	173.3	262.0	1241.1	127.5
Octubre	40.0	275.1	300.8	1079.6	103.5	39.7	230.6	280.4	1158.8	124.0	38.9	310.3	384.4	1381.4	133.7
Noviembre	37.9	199.4	335.7	1273.3	104.2	39.0	106.0	205.6	1046.2	98.8	37.9	179.3	317.3	1392.9	129.2
Diciembre	38.3	18.0	160.7	1139.6	87.0	38.1	87.5	232.2	1116.4	83.5	37.8	372.8	488.9	1629.1	137.7
<b>Total</b>					<b>920.1</b>					<b>1051.6</b>					<b>1378.3</b>

## Continuación

<i>Mes/Exp.</i>	<i>CCSRNIES_A2I</i>					<i>CSIROMK2B_A2I</i>					<i>HadCM3_A2_SDSM</i>				
	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidroeo (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidroeo (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidroeo (GWh)</b>
Enero	37.8	21.4	185.4	1408.0	112.8	38.1	16.9	169.9	1370.4	109.3	37.5	24.2	202.4	1436.5	115.7
Febrero	39.2	19.9	119.2	1166.4	81.4	39.5	27.1	111.9	1128.9	78.3	39.1	19.4	127.7	1199.9	84.4
Marzo	40.3	62.7	108.2	969.9	72.3	40.4	43.7	88.5	909.7	2.4	40.1	55.9	112.4	999.5	75.0
Abril	39.1	128.5	218.1	1037.8	73.9	40.1	139.3	183.0	937.8	2.5	39.3	142.8	221.9	1064.9	76.4
Mayo	38.1	318.5	428.5	1446.0	116.5	38.1	338.0	445.6	1429.0	109.1	37.8	350.3	471.7	1550.0	132.0
Junio	37.5	248.5	395.4	1477.6	132.6	37.4	325.8	469.8	1612.5	133.8	37.6	233.2	380.1	1498.7	132.5
Julio	37.7	238.9	379.3	1433.6	136.9	37.7	301.1	432.3	1599.0	140.1	37.8	229.9	366.7	1420.1	136.5
Agosto	37.2	315.8	467.9	1630.0	138.5	37.0	384.6	535.7	1630.0	140.3	37.7	415.9	529.8	1630.0	138.3
Septiembre	36.8	215.2	401.5	1630.0	136.1	37.0	234.5	409.2	1630.0	136.1	37.5	252.9	401.8	1630.0	136.1
Octubre	37.6	347.8	479.2	1630.0	140.6	37.8	375.1	489.9	1630.0	140.6	37.4	381.6	515.7	1630.0	140.6
Noviembre	37.2	171.8	344.6	1578.2	135.5	37.4	203.0	362.3	1615.4	135.9	36.7	152.7	350.9	1590.3	135.8
Diciembre	37.0	126.6	316.2	1619.9	131.5	37.4	121.7	292.7	1603.8	130.4	36.9	118.5	310.5	1617.9	132.1
<b>Total</b>					<b>1408.4</b>					<b>1258.8</b>					<b>1435.4</b>

<i>Mes/Exp.</i>	<i>Estadístico*</i>		<i>Actual</i>				
	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidroeo (GWh)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>PCP (mm)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vol.Almac (MMC)</b>	<b>Gen.Hidroeo (GWh)</b>
Enero	1094.1	65.3	37.2	17.6	172.3	1373.9	109.6
Febrero	915.0	30.9	38.9	18.7	131.2	1162.3	80.8
Marzo	781.8	11.8	39.7	51.8	129.4	1003.7	75.0
Abril	825.0	18.6	38.9	131.5	225.7	1073.8	77.0
Mayo	1087.3	73.6	37.3	324.9	414.1	1437.6	118.0
Junio	1225.9	114.5	37.0	250.3	476.8	1629.6	134.1
Julio	1289.0	127.0	37.3	232.1	493.4	1630.0	140.6
Agosto	1317.7	125.9	37.1	322.7	452.6	1630.0	140.6
Septiembre	1327.6	120.6	36.8	215.6	431.9	1630.0	136.1
Octubre	1337.1	128.8	37.0	349.3	461.5	1630.0	140.6
Noviembre	1336.3	118.4	36.6	178.6	408.5	1630.0	136.1
Diciembre	1277.7	97.4	36.5	119.0	286.2	1602.4	130.4
<b>Total</b>		<b>1032.7</b>					<b>1418.9</b>

La **Tabla 13**, resume los valores de los cambios anuales que se pueden dar en la generación de energía eléctrica para el periodo 2010-2039, obtenidos a partir de los diferentes modelos de clima incluyendo el denominado HadCM3\_A2\_SDSM.

**Tabla 13.** Cambios en generación hidroeléctrica y sus variables relacionadas.

Modelo/Variable	Generación Eléctrica		Tmax.	Precipitación	Caudal
	Cambio % <sup>£</sup>	Cambio % <sup>∞</sup>	Cambio °C	Cambio %	Cambio % <sup>†</sup>
CCSRNIES_A21	-0.7	-16.5	0.5	0.16	-5.9
CSIROMK2B_A21	-11.3	-25.4	0.7	13.5	-2.3
CGCM2_A21	-0.8	-16.5	0.7	-5.4	-11.8
CGCM2_A22	-13.7	-27.4	0.9	-2.6	-13.3
CGCM2_A23	-13.4	-27.1	0.8	-3.1	-11.3
HadCM3_A21	-35.2	-45.5	1.9	-21.0	-34.9
HadCM3_A22	-25.9	-37.7	1.6	-6.2	-23.8
HadCM3_A23	-2.9	-18.3	1.4	9.6	-14.2
HadCM3_A2_SDSM	0.6	-15.4	0.5	7.5	-2.3
Estadístico <sup>‡</sup>	-27.2	-38.8			
Referencia o Actual	0.0	-15.9	–	–	–

<sup>£</sup> Cálculo realizado respecto al escenario denominado de Referencia (1418.9 GWh/año), que sería el de partida o actual.

<sup>∞</sup> Cálculo realizado respecto a la máxima capacidad de generación (1687.2 GWh/año).

<sup>†</sup> Cálculo realizado respecto al caudal anual histórico (4083.6 MMC)

<sup>‡</sup> Asume una reducción natural anual del la oferta hídrica en el área de estudio del 2%, según el IDEAM

Al observar los valores de la primera columna (cambios respecto al escenario de referencia), se encuentra que solo un modelo predice pequeños aumentos en la generación, el HadCM3\_A2\_SDSM con 0.6%. Los restantes indican reducciones que pueden ir de 0.7% a 35.2%; mientras que en la segunda columna (cambios respecto a la máxima capacidad de generación), todos los escenarios incluyendo el de referencia indican disminuciones en un rango de 15.4% a 45.5%.



La reducción en el aporte de caudal (columna 5) es evidente en todos los escenarios estudiados, aunque se proyecten aumentos de la precipitación.

En este punto es importante resaltar que los aumentos de precipitación que presentan algunos escenarios (columna 4) para el periodo 2010-2039 aun no son muy relevantes, lo que puede ser compensado por el aumento de la temperatura, la evapotranspiración y otros procesos relacionados, además se debe mantener un flujo constante de 300 m<sup>3</sup>/s aguas abajo de la presa, de acuerdo a lo reglamentado y a las especificaciones técnicas y operativas de la misma, aspectos que en su conjunto influyen a su vez en la reducción de la generación de energía eléctrica.

No solamente la generación de energía eléctrica (*Figura 23a*) está directamente relacionada con la disminución del aporte de caudal del Río Sinú al embalse Urrá 1, sino también el volumen almacenado en presa (*Figura 23b*).

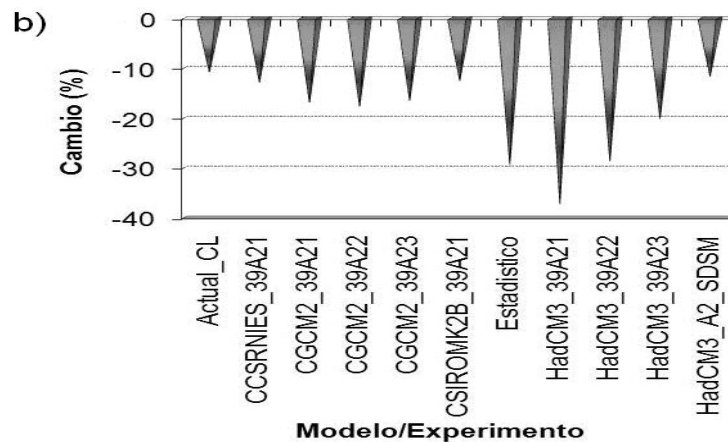
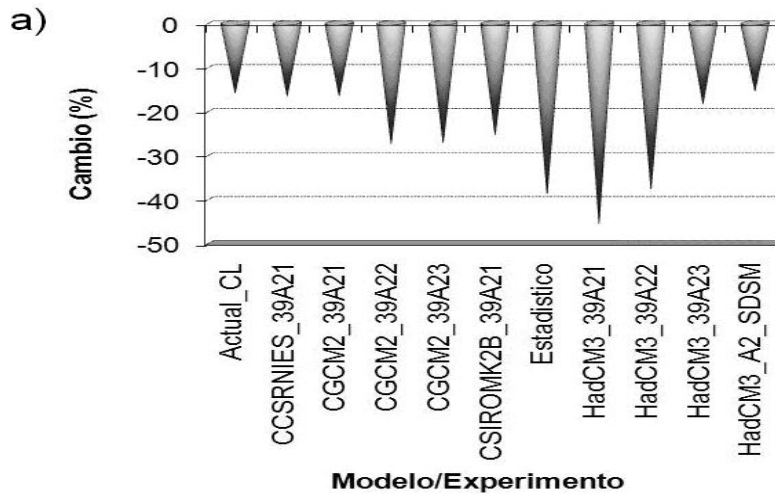
Es importante notar que el escenario de referencia (actual), ya revela una disminución de 10.9% del volumen, respecto al máximo técnico. En la *Tabla 14* se encuentra el promedio anual de volumen almacenado de acuerdo a los diferentes escenarios, el porcentaje de cambio respecto al escenario de referencia y al volumen máximo técnico.

**Tabla 14.** Volumen almacenado y porcentaje de cambio, diferentes escenarios

Modelo/Exp	Vol. Almac. MMC	%Cambio <sup>a</sup>	%Cambio_VMT <sup>b</sup>
CCSRNIES_A21	1418.9	-2.3	-12.9
CSIROMK2B_A21	1424.7	-1.9	-12.6
CGCM2_A21	1353.2	-6.9	-17.0
CGCM2_A22	1340.2	-7.8	-17.8
CGCM2_A23	1360.1	-6.4	-16.6
HadCM3_A21	1022.0	-29.7	-37.3
HadCM3_A22	1161.3	-20.1	-28.8
HadCM3_A23	1300.7	-10.5	-20.2
HadCM3_A2_SDSM	1439.0	-1.1	-11.7
Estadístico	1151.2	-20.8	-29.4
Referencia o Actual	1452.8	0.0	-10.9

<sup>a</sup> Con relación al escenario de referencia, igual a 1452.8 Millones de Metros Cúbicos (MMC)

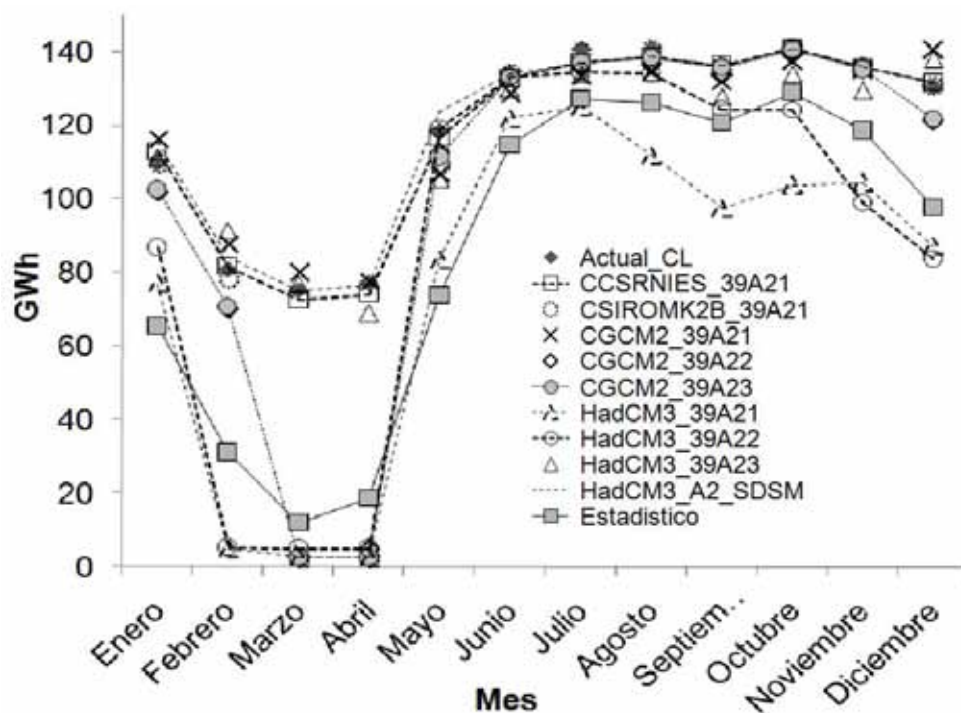
<sup>b</sup> Con relación al VMT: volumen máximo técnico, igual a 1630 Millones de Metros Cúbicos (MMC)



**Figura 23.** Reducciones en %, para el periodo 2010-2039. a) Generación eléctrica. b) Volumen almacenado en presa.

Las reducciones observadas en la generación de energía eléctrica, son de gran importancia al momento de cubrir las demandas de la misma, las cuales según la UPME (2006), presentaron un crecimiento promedio anual de 2.8% del 2000 al 2005. Es de resaltar que el año 2005 la demanda de energía eléctrica mostró un crecimiento acelerado de 5.8%, además se proyecta que para el periodo 2006-2025, la demanda crecerá a una tasa interanual de 3.3% a nivel nacional.

La **Figura 24**, ilustra el comportamiento mensual de la generación de energía actual y proyectada, con el propósito de una mejor visualización solo se incluyen líneas de tendencia a algunos escenarios.



**Figura 24.** Proyecciones de generación mensual de energía eléctrica, represa Urrál, 2010-2039.

En la figura se evidencia que las mayores disminuciones se dan en el primer semestre del año, siendo los meses más críticos de mediados de Febrero a mediados de Abril, época cuando son mayores las temperaturas en el área de estudio, además que se proyectan importantes aumentos de la misma (Ver *Figura 17*), mientras que las precipitaciones son escasas.

#### 4.8. Propuesta de un índice de vulnerabilidad.

El anterior análisis de sensibilidad, permite proponer un índice de vulnerabilidad del sistema, sencillo de aplicar, explicado en la metodología en función de los cambios en la temperatura máxima y la precipitación. De acuerdo a los valores de la *Tabla 13* y al análisis cuidadoso de los resultados consignados en la *Tabla 12*, se pueden establecer ciertos rangos de influencia de dichas variables en la generación eléctrica: bajos, medianos y altos para la temperatura y alto, mediano, ligeramente bajo, bajo y muy bajo para la precipitación. (*Tabla 15*).

**Tabla 15.** Criterios para la elaboración del índice de vulnerabilidad.

Variable	Tmax. °C			Precipitación %				
	Alto	Mediano	Bajo	Alto	Mediano	Lig.bajo	Bajo	Muy bajo
<b>Influencia</b>	Alto	Mediano	Bajo	Alto	Mediano	Lig.bajo	Bajo	Muy bajo
<b>Criterio</b>	≥ 1.5	0.6-1.4	0.1-0.5	≤ -10	-5.1 a -9.9	-5 a 5	5.1-9.9	≥ 10
<b>Ponderador</b>	3	2	1	5	4	3	2	1

El índice propuesto es:

$$IVGHR = (1 * T_{maxr} + 2 * PCPr) / 3 \quad (4.2)$$

Donde IVGHR es el índice de vulnerabilidad relativa de generación hidroeléctrica,  $T_{maxr}$  es el índice de cambio de temperatura máxima relativo y PCPr es el índice de cambio en precipitación relativo.

En la *Tabla 16* y *Tabla 17*, se ilustrar el cálculo de  $T_{maxr}$  y PCPr para los modelos CCSRNIES\_A21 y HadCM3\_A21, los valores correspondientes a la temperatura máxima y a la precipitación, se seleccionan de la *Tabla 13*.

**Tabla 16.** *Cálculo de  $T_{maxr}$ .*

Variable	Tmax. °C			Tmaxr
	Alto(3)	Mediano(2)	Bajo(1)	
<b>Influencia</b>				
<b>Criterio</b>	≥ 1.5	0.6-1.4	0.1-0.5	
<b>CCSRNIES_A21</b>	0	0	1	$(0*3+0*2+1*1)/6=0.17$
<b>HadCM3_A21</b>	1	0	0	$(1*3+0*2+0*1)/6=0.5$

**Tabla 17.** *Cálculo de PCPr.*

Variable	Precipitación %					PCPr
	Alto (5)	Mediano (4)	Lig.bajo (3)	Bajo (2)	Muy bajo (1)	
<b>Influencia</b>						
<b>Criterio</b>	≤ -10	-5.1 a -9.9	-5 a 5	5.1-9.9	≥ 10	
<b>CCSRNIES_A21</b>	0	0	1	0	0	$(0*5+0*4+1*3+0*2+0*1)/15=0.2$
<b>HadCM3_A21</b>	1	0	0	0	0	$(1*5+0*4+0*3+0*2+0*1)/15=0.33$

Como se había especificado en la metodología, las variables se calificaron de acuerdo a su presencia o no en los diferentes grados de influencia, tomando el valor uno (1) cuando esta presente y cero (0) en caso contrario, luego fueron multiplicadas por un coeficiente según la importancia que se le asignó a cada categoría y posteriormente son normalizados por la suma de ponderantes; con lo que se intenta un proceso de “cuantificación”. El IVGHR para estos modelos sería:

$$IVGHR = (1*0.17 + 2*0.2)/3 = 0.19 \text{ (CCSRNIES\_A21)}$$

$$IVGHR = (1*0.5 + 2*0.33)/3 = 0.39 \text{ (HadCM3\_A21)}$$

Como se puede observar, el índice sólo puede tener valores que van de 0.1 a 0.4, debido a que el Tmaxr y PCPr sólo pueden tener *un valor* de acuerdo al criterio de influencia y al ser evaluados ambos en el límite inferior y superior, se obtiene como resultado dicho rango. Dentro de este rango, se pueden establecer a su vez los criterios de vulnerabilidad del sistema de la siguiente forma: vulnerabilidad baja, valores menores o iguales a 0.21; media, entre 0.22 a 0.28 y alta, valores mayores o iguales a 0.29, establecidos teniendo en cuenta la relación proporcional de la distancia entre el límite inferior y superior y de estos con el punto medio del rango. En el caso particular del escenario CCSRNIES\_A21, se estima una baja vulnerabilidad del sistema; contrario a lo mostrado por el HadCM3\_A21.

Aplicando el índice a todos los escenarios de la *Tabla 13*, se puede determinar que la probabilidad de que exista una alta vulnerabilidad del sistema es de 33.3%; media de 22.2% y baja de 44.4% (*Tabla 18*).

**Tabla 18.** Índice de vulnerabilidad de generación hidroeléctrica.

Modelo	Cambio °C	Cambio PCP %	Tmaxr	PCPr	IVGHR	Categoría	Probabilidad %
HadCM3_A21	1.9	-21.0	0.5	0.33	0.39		
HadCM3_A22	1.6	-6.2	0.5	0.27	0.35	Alta	33.3
CGCM2_A21	0.7	-5.4	0.33	0.27	0.29		
CGCM2_A22	0.9	-2.6	0.33	0.2	0.24		
CGCM2_A23	0.8	-3.1	0.33	0.2	0.24	Media	22.2
CCSRNIES_A21	0.5	0.16	0.17	0.2	0.19		
CSIROMK2B_A21	0.7	13.5	0.33	0.07	0.15		
HadCM3_A23	1.4	9.6	0.33	0.13	0.2	Baja	44.4
HadCM3_A2_SDSM	0.5	7.5	0.17	0.13	0.15		

Existen antecedentes para el manejo del índice propuesto, (Lajones 1999; Jiménez y Serna, 2000; Ospina, 2004; Ospina y Lema, 2004; Ospina y Lema, 2005), al darle un tratamiento a las variables y a los índices de carácter cuantitativo, para superar las limitaciones de las variables nominales y utilizar pruebas sólidas de calificación y análisis inferencias.

La estructura del índice es sencillo de aplicar y tiene una gran funcionalidad, tratando de integrar variables de fácil medición y consecución, con el propósito de evitar altos costos y esfuerzos desgastantes de medición; además por su carácter aditivo permite agregar otras variables como por ejemplo, cobertura vegetal, tasas de erosión, velocidad de sedimentación, eficiencia técnica y operacional, entre otras. La replica del índice en diferentes regiones y proyectos de generación hidroeléctrica, permitiría acercarse a los análisis multivariados como: análisis de componentes principales (ACP), análisis de factores (ADF), análisis de cluster (ADC), obteniendo una mayor y mejor interpretación de los efectos del cambio climático sobre el sistema objeto de estudio; mayor detalle sobre la construcción, manejo y el tratamiento estadístico de los índices se puede encontrar en (Ospina, 2004; Ospina y Lema, 2004; Ospina y Lema, 2005).

Con lo expuesto anteriormente, mediante el seguimiento de los cambios en la temperatura y la precipitación, se pueden encontrar señales de la vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico, con la posibilidad de trabajar en su depuración y complementación de acuerdo a la información disponible y objetivos o características propias de la investigación o análisis que se desee realizar.

Adicionalmente se evaluó la relación oferta\_demanda del recurso hídrico, considerando la demanda total para todos los usos (domestico urbano y rural, industrial, comercial) actual y sus respectivos aumentos proyectados, disminución de la oferta natural del recurso, además se calculó el Índice de Presión (I.P.) para el área de estudio, según la **Tabla 19**.

**Tabla 19.** Valores de las variables para el análisis de la relación oferta\_demanda y el I.P.

Variable	Valor actual	Proyección o Cambio	Unidad
<b>Población Urbana</b>	738113 <sup>a</sup>	2% anual	Personas
<b>Población Rural</b>	729816 <sup>a</sup>	2% anual	Personas
<b>Demanda Total</b>	161.6 <sup>b</sup>	3% anual	MMC
<b>Oferta Natural</b>	16643 <sup>b</sup>	-2% anual	MMC
<b>I.P.</b>	971.0		

<sup>a</sup> Fuente: Dane, 2005

<sup>b</sup> Fuente: IDEAM, 2000

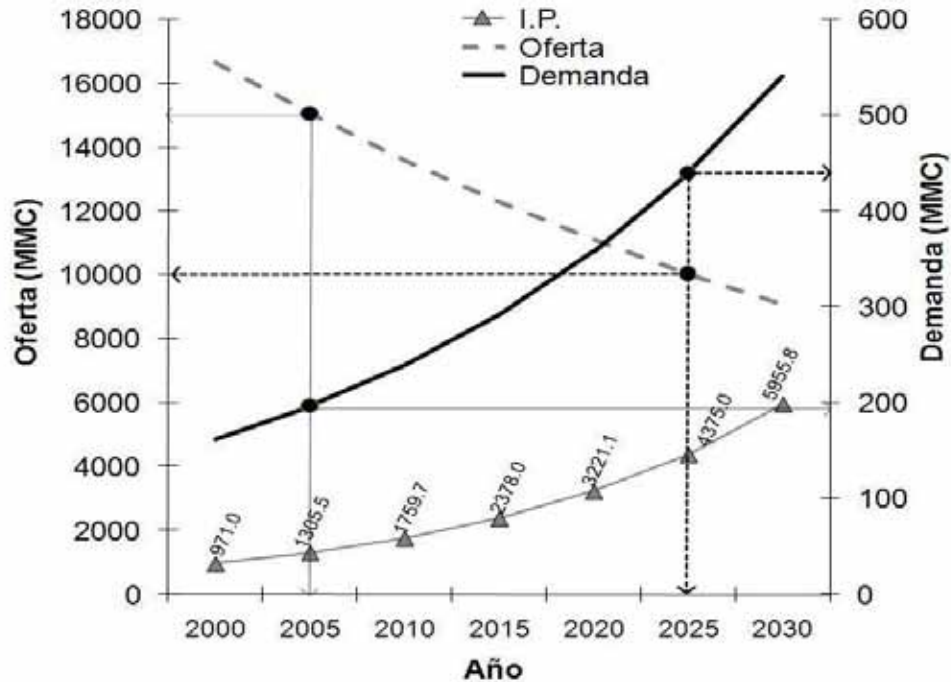
La **Tabla 20** y la **Figura 25**, muestran las proyecciones de la oferta natural de los recursos hídricos, y la demanda para satisfacer las necesidades de la población, también se calcula el I.P., de acuerdo a los datos registrados en la **Tabla 19**.

**Tabla 20.** Proyecciones oferta\_demanda e I.P. Cuenca del Sinú\_Caribe.

Variable/Año	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
<b>I.P.*</b>	971.0	1305.5	1759.7	2378.0	3221.1	4375.0	5955.8
<b>Oferta</b>	16643.0	15044.0	13598.5	12292.0	11111.0	10043.5	9078.5
<b>Demanda</b>	161.6	196.4	239.3	292.3	357.9	439.4	540.7

\*Resulta de multiplicar el cociente de la demanda sobre la oferta por 100000.





**Figura 25.** Proyecciones oferta\_demanda e I.P.

De acuerdo a los estudios realizados por el IDEAM (2000), el I.P. se encuentra comprendido en los siguientes rangos: < 40, mínimo; entre 40-119, bajo; 120-249, medianamente bajo; 250-499 medio; 500-999, medio alto; 1,000-4,000, alto y >4,000, muy alto. En la figura se observa que aproximadamente para el año 2005 el índice de presión ya debería haber pasado de medio\_alto a alto con un valor de 1,305.5, que corresponde con una demanda de 196.4 MMC y una oferta de 15,044.0 MMC (flechas línea sólida en la figura); para el 2025 el I.P. estaría catalogado como muy alto, alcanzando un valor 4,375.0 y corresponde a una relación oferta\_demanda de 10,043.5 MMC y 439.4 MMC respectivamente (flechas punteadas en la figura), pudiéndose iniciar y/o potenciar conflictos por el recurso.

#### 4.9. Análisis de la relación oferta/demanda bajo escenarios de cambio climático.

El área de estudio y la ubicación aproximada de los 28 centros de demanda simulados mediante la aplicación del WEAP, son presentados en la **Figura 26**. En la **Tabla 21**, se consignan los valores de las variables con relación a la oferta\_demanda de los recursos hídricos en la Cuenca del Sinú\_Caribe y a nivel Nacional, de acuerdo a los estudios realizados por el Ideam.

**Tabla 21.** Variables para el cálculo oferta\_demanda y sus proyecciones, según el Ideam.

Aspecto-variable	Criterios-proyecciones
Consumo Z. Urbana	170 lt/hab/día
Consumo Z. Rural	120 lt/hab/día
Oferta media anual neta Cuenca Sinú_Caribe	16643 Millones de metros cúbicos (MMC)
Demanda Anual Cuenca del Sinú_Caribe	161.11 MMC
Índice de presión anual (x100,000), Sinú_Caribe	974 (Medio Alto)
Crecimiento poblacional 2015-2025	Proyecciones intercensales 1995-2005
C. sector industrial, comercial, pecuario y agrícola	3% (prom histor. aprox de 2.6%, últimos 20 años del PIB)
Oferta de agua para abastecimiento 2015-2025	Disminución de 2% anual
Demanda	Aumento de 3% anual
Índice de escasez municipal	Incrementa en el grupo de los índices altos
Incremento de población afectada, índice alto	1.7 millones (2000)-13.8 (2015)-17.5 (2025), 30% de la población proyectada.
Población afectada índice de escasez medio alto y medio	55%
Cabeceras municipales escasez alta	38 (2000)-72 (2015)-102 (2025)
Cabeceras municipales escasez medios-altos	48 (2000)-101 (2015)-138 (2025)
Población en desabastecimiento alto en condiciones hidrológicas secas	66% (2015)-69% (2025)

Fuente: Ideam 2000, 2001

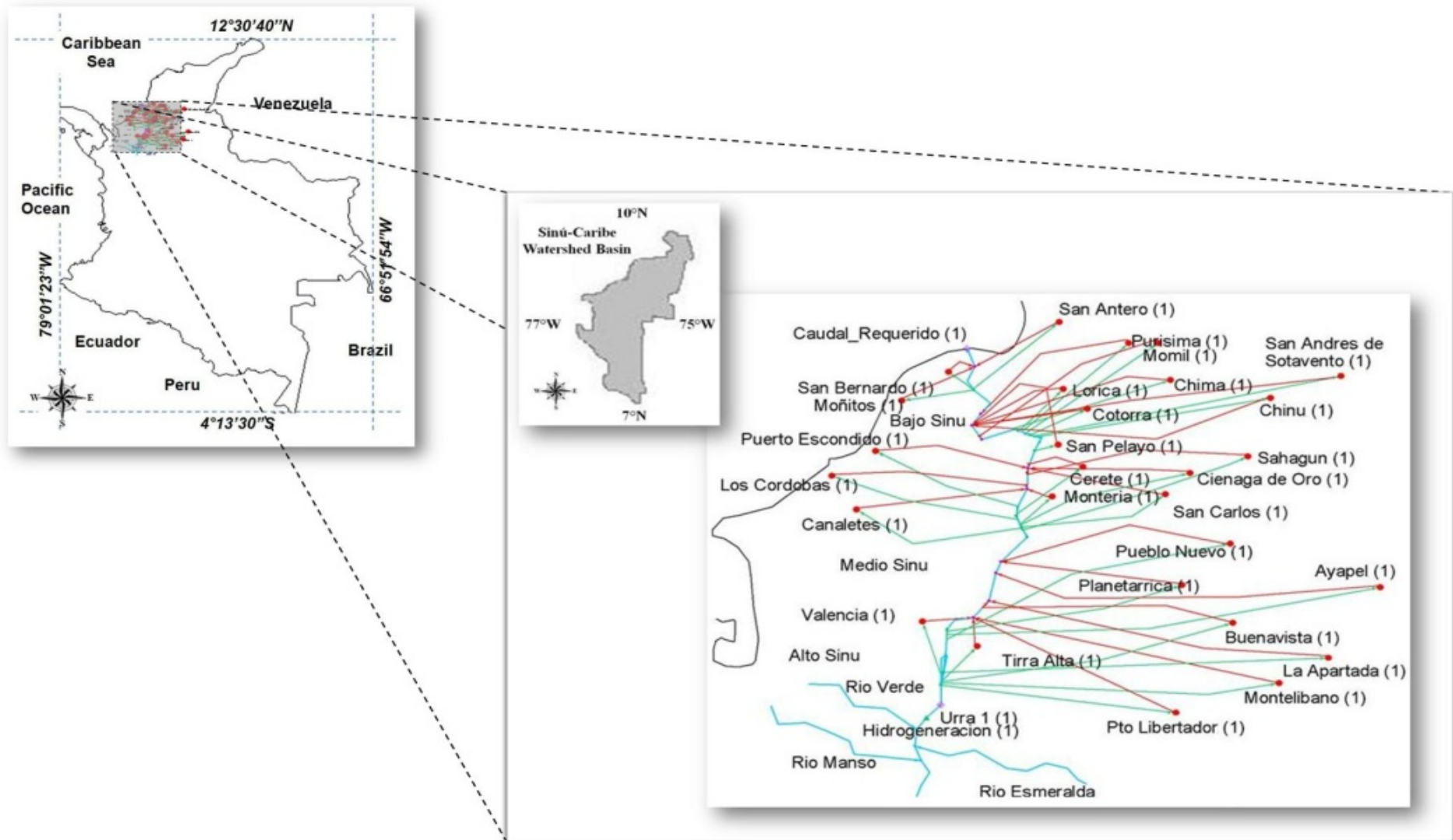


Figura 26. Ubicación del área de estudio y centros de demanda.

La *Tabla 22*, relaciona la población urbana, rural y total de 28 municipios que se encuentran en la Cuenca objeto de estudio, determinada en el censo del 2005 por el DANE.

*Tabla 22. Población en la Cuenca del Sinú\_Caribe.*

<b>Municipio</b>	<b>Pob. Total</b>	<b>Pob. Urbana</b>	<b>Pob. Rural</b>
<b>Montería</b>	378,970	286,575	92,395
<b>Ayapel</b>	42,542	20,456	22,086
<b>Buenavista</b>	19,011	6,760	12,251
<b>Canalete</b>	17,315	3,410	13,905
<b>Cereté</b>	83,917	47,094	36,823
<b>Chimá</b>	13,639	2,815	10,824
<b>Chinú</b>	43,274	20,886	22,388
<b>Ciénaga de Oro</b>	53,145	20,838	32,307
<b>Cotorra</b>	15,113	3,394	11,719
<b>La Apartada</b>	12,702	9,935	2,767
<b>Lorica</b>	110,316	44,417	65,899
<b>Los Córdoba</b>	17,837	3,306	14,531
<b>Momil</b>	14,092	8,712	5,380
<b>Montelíbano</b>	73,247	49,024	24,223
<b>Moñitos</b>	23,597	5,339	18,258
<b>Planeta Rica</b>	61,692	38,323	23,369
<b>Pueblo Nuevo</b>	31,536	11,177	20,359
<b>Puerto Escondido</b>	21,786	3,534	18,252
<b>Puerto Libertador</b>	35,186	13,175	22,011
<b>Purísima</b>	14,677	6,145	8,532
<b>Sahagún</b>	87,635	44,985	42,650
<b>San Andrés Sotavento</b>	63,147	8,555	54,592
<b>San Antero</b>	26,123	14,406	11,717
<b>San Bernardo del Viento</b>	31,405	8,177	23,228
<b>San Carlos</b>	23,622	4,524	19,098
<b>San Pelayo</b>	39,260	6,902	32,358
<b>Tierralta</b>	78,770	32,875	45,895
<b>Valencia</b>	34,373	12,374	21,999
<b>Total</b>	<b>1,467,929</b>	<b>738,113</b>	<b>729,816</b>

Fuente: DANE, 2005

Por lo varias veces mencionado, los diferentes modelos de circulación general muestran aumentos en la temperatura máxima, aumento o disminución en la precipitación y disminución en caudales para la región.

En este punto se construye un nuevo escenario denominado promedio ponderado usando pesos a los aportes de caudal para cada uno de los modelos de acuerdo a la **Tabla 23** y normalizado por la suma de los mismos, teniendo en cuenta las variaciones de Tmax y PCP proyectadas, siguiendo la lógica de evitar los efectos más adversos que se puedan encontrar, es decir, aquellos modelos que proyectan mayor aumento en temperatura y más disminución en precipitación, se les otorga los mayores pesos y viceversa.

La media anual para los caudales del escenario promedio ponderado es de  $428.3 \text{ m}^3/\text{s} \pm 107.8$  con una confiabilidad del 95%

**Tabla 23.** Pesos para el cálculo del escenario de caudales promedio ponderado.

<b>Modelo/Experimento</b>	<b>Peso</b>
CCSRNIES_A21	1
CSIROMK2B_A21	1
CGCM2_A21	2
CGCM2_A22	2
CGCM2_A23	2
HadCM3_A21	4
HadCM3_A22	3
HadCM3_A23	2
<b>Suma</b>	<b>17</b>

Los valores encontrados para los diferentes modelos se presentan en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Proyecciones de las variables climáticas\_hidrológicas periodo 2010-2039, diferentes escenarios. Toda la Cuenca.

<i>Mes/Var.</i>	<i>CGCM2_A21</i>			<i>CGCM2_A22</i>			<i>CGCM2_A23</i>			<i>HadCM3_A21</i>			<i>HadCM3_A22</i>			<i>HadCM3_A23</i>		
	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)
Enero	37.4	19.1	316.2	38.3	19.2	249.2	38.2	14.2	251.2	38.5	11.7	224.4	38.4	94.2	343.9	38.3	26.7	262.9
Febrero	38.7	26	234.9	40	17.5	124.5	40	18.4	127.6	39.9	6.6	117.7	40	4.8	108.7	39.8	147.7	318.2
Marzo	39.6	48.4	198.2	40.7	64.8	139.3	40.9	67.2	128.7	40.7	58.6	132.2	40.5	110.7	214	40.6	50.8	128
Abril	39	111.1	332.5	39.3	127.4	325.7	39.6	125.8	297.7	40.3	92.5	203.8	39.8	145.8	312.6	40.1	114.3	249.2
Mayo	39	221.2	470.3	38	360.1	729.6	37.5	340.5	740	38.8	293.3	579.4	37.8	402	800.2	38.6	294.6	595.1
Junio	38.4	266.3	576.6	37.8	246.9	590.3	37.5	243.7	610.1	38.7	215.3	486.3	38.4	219.2	508.8	38.4	240.8	539.5
Julio	38.4	220	515.3	38	217.1	539.7	37.7	241.1	589.6	39.3	196.7	413.1	38.7	220.9	489	38.4	233.3	529.3
Agosto	38.4	287.6	604.8	37.9	277	622.2	37.7	310.8	681	39.7	241.7	443.9	39.2	286.9	545.9	38.9	279.5	558.2
Septiembre	37.8	205.2	538	37.8	234.7	577.6	37.5	230.7	592.6	40	139	285.8	39.2	167.5	387.7	39	173.3	406.4
Octubre	37.8	271	624.9	37.9	301.2	658	37.6	300.4	674.6	40	275.1	466.5	39.7	230.6	434.8	38.9	310.3	596.3
Noviembre	37.2	256.2	647.1	37.6	193.6	536.4	37.4	150.1	492.5	37.9	199.4	520.7	39	106	318.9	37.9	179.3	492.2
Diciembre	37	161.7	538.6	37.6	94.9	401.1	37.3	100.8	432.5	38.3	18	249.2	38.1	87.5	360.2	37.8	372.8	758.3
Promedio			465.6			457.7			468.2			343.6			402.1			452.8
Suma			5587.3			5492.6			5618.1			4122.9			4824.7			5433.4

<i>Mes/Var.</i>	<i>CCSRNIES_A21</i>			<i>CSIROMK2B_A21</i>			<i>Actual</i>			<i>Prom_Pond</i>
	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Tmax</i> (°C)	<i>PCP</i> (mm)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Caudal</i> (m <sup>3</sup> /s)
Enero	37.8	21.4	287.6	38.1	16.9	263.6	37.2	17.6	267.2	272.9
Febrero	39.2	19.9	184.9	39.5	27.1	173.5	38.9	18.7	203.4	162.7
Marzo	40.3	62.7	167.8	40.4	43.7	137.2	39.7	51.8	200.7	156.7
Abril	39.1	128.5	338.3	40.1	139.3	283.8	38.9	131.5	350	208.3
Mayo	38.1	318.5	664.9	38.1	338	691.1	37.3	324.9	642.2	655.5
Junio	37.5	248.5	613.3	37.4	325.8	728.6	37	250.3	739.3	555.7
Julio	37.7	238.9	588.3	37.7	301.1	670.6	37.3	232.1	765.1	513.3
Agosto	37.2	315.8	725.8	37	384.6	830.9	37.1	322.7	701.9	582.5
Septiembre	36.8	215.2	622.8	37	234.5	634.7	36.8	215.6	669.7	458.4
Octubre	37.6	347.8	743.3	37.8	375.1	759.8	37	349.3	715.7	575.4
Noviembre	37.2	171.8	534.4	37.4	203	561.9	36.6	178.6	633.5	498.4
Diciembre	37	126.6	490.5	37.4	121.7	453.9	36.5	119	443.8	428.3
Promedio			496.8			515.8			527.7	428.3
Suma			5961.5			6189.7			6332.4	5140

La **Tabla 24** presenta los cambios mensuales y anuales de dichas variables para el periodo 2010-2039, bajo los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A2, debido a que los autores consideran que la producción de gases de efecto de invernadero al ritmo de las características y consideraciones de los escenarios de la familia A2, implicarían un aumento mas rápido y mayor en la temperatura y cambios mas marcados en la precipitación, con relación a los cambios observados en los escenarios B2, cuyas proyecciones de producción de estos gases de acuerdo a sus consideraciones son menores que en el caso A2.

Es importante resaltar que los caudales que se presentan en la **Tabla 24** difieren de los presentados en la **Tabla 12**, debido a que en el primer caso se tiene en cuenta el caudal aproximado en toda la cuenca, mientras que en el segundo solo se tienen en cuenta los registros en el sitio de presa.

#### **4.9.1. Cálculo de las demandas del recurso hídrico.**

La anterior información permitió calcular la demanda del recurso para uso domestico, industria (Agropecuaria) y comercial, en los 28 sitios ubicados dentro de la Cuenca, es importante anotar que al contar solo con datos de demanda para la población y el consumo total anual, la diferencia entre ambas se distribuyó para el uso industrial (80%) y comercial (20%) de acuerdo al tamaño de la población en las cabeceras municipales. La **Tabla 25**, contiene los valores de la demanda anual de agua en millones de metros cúbicos (MMC) para cada uno de los municipios, discriminados por consumo de población rural y urbana, industria y comercio.

**Tabla 25. Demanda de agua Cuenca del Sinú\_Caribe.**

<b>Municipios</b>	<b>Dem_Urb</b>	<b>Dem_Rur.</b>	<b>Dem_Pob.</b>	<b>Dem_Ind_Agrop.</b>	<b>Dem_Com.</b>	<b>Total</b>
<b>Montería</b>	17.8	4.0	21.8	25.9	6.5	<b>54.2</b>
<b>Ayapel</b>	1.3	1.0	2.2	1.8	0.5	<b>4.5</b>
<b>Buenavista</b>	0.4	0.5	1.0	0.6	0.2	<b>1.7</b>
<b>Canalete</b>	0.2	0.6	0.8	0.3	0.1	<b>1.2</b>
<b>Cereté</b>	2.9	1.6	4.5	4.3	1.1	<b>9.9</b>
<b>Chimá</b>	0.2	0.5	0.6	0.3	0.1	<b>1.0</b>
<b>Chinú</b>	1.3	1.0	2.3	1.9	0.5	<b>4.6</b>
<b>Ciénaga de Oro</b>	1.3	1.4	2.7	1.9	0.5	<b>5.1</b>
<b>Cotorra</b>	0.2	0.5	0.7	0.3	0.1	<b>1.1</b>
<b>La Apartada</b>	0.6	0.1	0.7	0.9	0.2	<b>1.9</b>
<b>Lorica</b>	2.8	2.9	5.6	4.0	1.0	<b>10.7</b>
<b>Los Córdoba</b>	0.2	0.6	0.8	0.3	0.1	<b>1.2</b>
<b>Momil</b>	0.5	0.2	0.8	0.8	0.2	<b>1.8</b>
<b>Montelíbano</b>	3.0	1.1	4.1	4.4	1.1	<b>9.6</b>
<b>Moñitos</b>	0.3	0.8	1.1	0.5	0.1	<b>1.7</b>
<b>Planeta Rica</b>	2.4	1.0	3.4	3.5	0.9	<b>7.7</b>
<b>Pueblo Nuevo</b>	0.7	0.9	1.6	1.0	0.3	<b>2.8</b>
<b>Puerto Escondido</b>	0.2	0.8	1.0	0.3	0.1	<b>1.4</b>
<b>Puerto Libertador</b>	0.8	1.0	1.8	1.2	0.3	<b>3.3</b>
<b>Purísima</b>	0.4	0.4	0.8	0.6	0.1	<b>1.4</b>
<b>Sahagún</b>	2.8	1.9	4.7	4.1	1.0	<b>9.7</b>
<b>San Andrés Sotavento</b>	0.5	2.4	2.9	0.8	0.2	<b>3.9</b>
<b>San Antero</b>	0.9	0.5	1.4	1.3	0.3	<b>3.0</b>
<b>San Bernardo del Viento</b>	0.5	1.0	1.5	0.7	0.2	<b>2.4</b>
<b>San Carlos</b>	0.3	0.8	1.1	0.4	0.1	<b>1.6</b>
<b>San Pelayo</b>	0.4	1.4	1.8	0.6	0.2	<b>2.6</b>
<b>Tierralta</b>	2.0	2.0	4.1	3.0	0.7	<b>7.8</b>
<b>Valencia</b>	0.8	1.0	1.7	1.1	0.3	<b>3.1</b>
<b>Total</b>	<b>45.8</b>	<b>32.0</b>	<b>77.8</b>	<b>66.7</b>	<b>16.7</b>	<b>161.1</b>



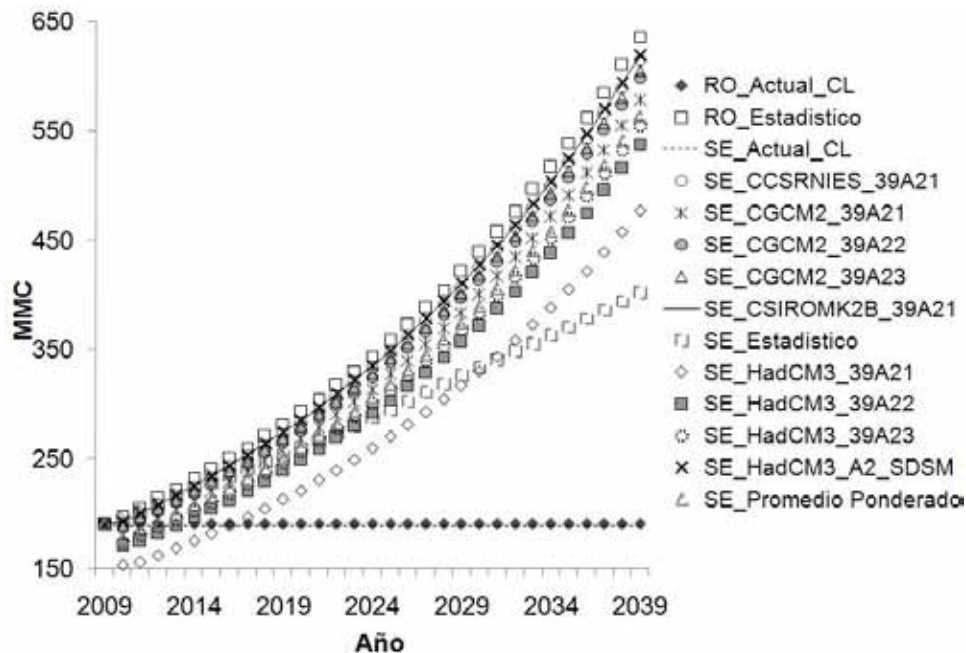
#### ***4.9.2. Análisis de las proyecciones de la relación oferta\_demanda del recurso hídrico y comparación de modelos, mediante la aplicación del WEAP.***

Los datos registrados en la **Tabla 24** y **Tabla 25**, fueron introducidos en el programa computacional WEAP versión 2.1., además de otra información necesaria como: prioridad de la demanda, inicialmente se asume prioridad uno (1) para todas las demandas, porcentaje de consumo en sitios de demanda aproximadamente de 35%, porcentaje de pérdida en sistemas de suministros y retornos, establecido en 15%, requerimiento de flujo de caudal aproximadamente 474.9 m<sup>3</sup>/s; en Colombia según la ley el máximo permitido de toma del caudal de la fuente no debe superar el 10% de la oferta neta de la misma (Granados y Buelvas, 2007).

La **Figura 27**, presenta el requerimiento de la oferta (RO) total (incluye pérdidas, reuso del recurso y manejo en sitios de demanda) actual y proyectado (denominado estadístico) de acuerdo a aumentos de la población y consumo en el área de estudio, y las proyecciones del suministro entregado (SE) teniendo en cuenta los diferentes escenarios de cambio climático, para el periodo 2010-2039 bajo los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A2. La demanda y oferta requerida proyectada se denominó estadístico, dado que asume los crecimientos poblacionales y aumentos de consumo, como se especifico anteriormente y en un inicio es igual para los demás escenarios.

En la figura se observa claramente como la oferta requerida actual (190.1 MMC) es aproximadamente igual al suministro entregado actual, sin embargo conforme transcurre el

tiempo todos los escenarios proyectan suministros inferiores a la oferta requerida, estando el suministro entregado al final del periodo 2039 entre 402.3-619.4 MMC dependiendo del escenario climático analizado, el promedio ponderado señala un suministro de 563.3 MMC; mientras que la oferta requerida alcanza un valor de 636.1 MMC, lo que sugiere una fuerte presión sobre el sistema y la necesidad de ordenamiento y manejo de los recursos hídricos en la Cuenca.



**Figura 27.** Requerimiento de la oferta y suministro entregado, Cuenca del Sinú\_Caribe, periodo 2010-2039.

La demanda y oferta requerida sectorial proyectadas para los 28 centros de demanda, se presenta en las **Tablas 26** y **27** respectivamente, en intervalo de cinco años

**Tabla 26. Demanda sectorial proyectada por municipio**

Municipio/Año	Demanda Urbana							Demanda Rural						
	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039
Ayapel	1.27	1.71	2.18	2.80	3.58	4.58	5.58	0.97	1.30	1.66	2.13	2.73	3.49	4.25
Buenavista	0.42	0.56	0.72	0.92	1.18	1.51	1.84	0.54	0.72	0.92	1.18	1.51	1.94	2.36
Canaletes	0.21	0.28	0.36	0.47	0.60	0.76	0.93	0.61	0.82	1.05	1.34	1.72	2.20	2.68
Cereté	2.92	3.93	5.03	6.44	8.24	10.55	12.85	1.61	2.17	2.78	3.55	4.55	5.82	7.09
Ciénaga de Oro	1.29	1.74	2.23	2.85	3.65	4.67	5.68	1.42	1.90	2.44	3.12	3.99	5.11	6.22
Cotorra	0.21	0.28	0.36	0.46	0.59	0.76	0.93	0.51	0.69	0.88	1.13	1.45	1.85	2.26
Chimá	0.17	0.23	0.30	0.38	0.49	0.63	0.77	0.47	0.64	0.82	1.04	1.34	1.71	2.08
Chinú	1.30	1.74	2.23	2.85	3.65	4.68	5.70	0.98	1.32	1.69	2.16	2.76	3.54	4.31
La Apartada	0.62	0.83	1.06	1.36	1.74	2.22	2.71	0.12	0.16	0.21	0.27	0.34	0.44	0.53
Lorica	2.76	3.71	4.74	6.07	7.77	9.95	12.12	2.89	3.88	4.97	6.36	8.14	10.42	12.69
Los Córdoba	0.21	0.28	0.35	0.45	0.58	0.74	0.90	0.64	0.86	1.10	1.40	1.79	2.30	2.80
Momil	0.54	0.73	0.93	1.19	1.52	1.95	2.38	0.24	0.32	0.41	0.52	0.66	0.85	1.04
Montelíbano	3.04	4.09	5.24	6.70	8.58	10.98	13.37	1.06	1.43	1.83	2.34	2.99	3.83	4.66
Montería	17.78	23.91	30.60	39.17	50.14	64.17	78.18	4.05	5.44	6.97	8.91	11.41	14.60	17.79
Moñitos	0.33	0.45	0.57	0.73	0.93	1.20	1.46	0.80	1.08	1.38	1.76	2.25	2.89	3.52
Planetarrica	2.38	3.20	4.09	5.24	6.70	8.58	10.45	1.02	1.38	1.76	2.25	2.89	3.69	4.50
Pto Libertador	0.82	0.92	1.02	1.12	1.24	1.37	1.48	0.96	1.09	1.20	1.32	1.46	1.61	1.75
Pueblo Nuevo	0.69	0.93	1.19	1.53	1.96	2.50	3.05	0.89	1.20	1.53	1.96	2.51	3.22	3.92
Puerto Escondido	0.22	0.29	0.38	0.48	0.62	0.79	0.96	0.80	1.08	1.38	1.76	2.25	2.89	3.51
Purísima	0.38	0.51	0.66	0.84	1.08	1.38	1.68	0.37	0.50	0.64	0.82	1.05	1.35	1.64
Sahagún	2.79	3.75	4.80	6.15	7.87	10.07	12.27	1.87	2.51	3.22	4.12	5.27	6.74	8.21
San Andrés de Sotavento	0.53	0.71	0.91	1.17	1.50	1.92	2.33	2.39	3.22	4.12	5.27	6.74	8.63	10.51
San Antero	0.89	1.20	1.54	1.97	2.52	3.23	3.93	0.51	0.69	0.88	1.13	1.45	1.85	2.26
San Bernardo	0.51	0.68	0.87	1.12	1.43	1.83	2.23	1.02	1.37	1.75	2.24	2.87	3.67	4.47
San Carlos	0.28	0.38	0.48	0.62	0.79	1.01	1.23	0.84	1.12	1.44	1.84	2.36	3.02	3.68
San Pelayo	0.43	0.58	0.74	0.94	1.21	1.55	1.88	1.42	1.91	2.44	3.12	4.00	5.11	6.23
Tierra Alta	2.04	2.74	3.51	4.49	5.75	7.36	8.97	2.01	2.70	3.46	4.43	5.67	7.25	8.84
Valencia	0.77	1.03	1.32	1.69	2.16	2.77	3.38	0.96	1.30	1.66	2.12	2.72	3.48	4.24

## Continuación

Municipio/Año	Demanda Industrial							Demanda Comercial						
	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039
Ayapel	1.80	2.15	2.49	2.89	3.35	3.88	4.37	0.50	0.60	0.69	0.80	0.93	1.08	1.21
Buнавista	0.60	0.72	0.83	0.96	1.12	1.29	1.46	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
Canaletes	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Cereté	4.30	5.13	5.95	6.90	8.00	9.27	10.44	1.10	1.31	1.52	1.77	2.05	2.37	2.67
Ciénaga de Oro	1.90	2.27	2.63	3.05	3.53	4.10	4.61	0.50	0.60	0.69	0.80	0.93	1.08	1.21
Cotorra	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Chimá	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Chinú	1.90	2.27	2.63	3.05	3.53	4.10	4.61	0.50	0.60	0.69	0.80	0.93	1.08	1.21
La Apartada	0.90	1.07	1.25	1.44	1.67	1.94	2.18	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
Lorica	4.00	4.78	5.54	6.42	7.44	8.63	9.71	1.00	1.19	1.38	1.60	1.86	2.16	2.43
Los Córdoba	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Momil	0.80	0.96	1.11	1.28	1.49	1.73	1.94	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
Montelíbano	4.40	5.25	6.09	7.06	8.19	9.49	10.68	1.10	1.31	1.52	1.77	2.05	2.37	2.67
Montería	25.90	30.93	35.85	41.56	48.18	55.86	62.87	6.50	7.76	9.00	10.43	12.09	14.02	15.78
Moñitos	0.50	0.60	0.69	0.80	0.93	1.08	1.21	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Planetarrica	3.50	4.18	4.84	5.62	6.51	7.55	8.50	0.90	1.07	1.25	1.44	1.67	1.94	2.18
Pto Libertador	1.20	1.43	1.66	1.93	2.23	2.59	2.91	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73
Pueblo Nuevo	1.00	1.19	1.38	1.60	1.86	2.16	2.43	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73
Puerto Escondido	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Purísima	0.60	0.72	0.83	0.96	1.12	1.29	1.46	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
Sahagún	4.10	4.90	5.68	6.58	7.63	8.84	9.95	1.00	1.19	1.38	1.60	1.86	2.16	2.43
San Andrés de Sotavento	0.80	0.96	1.11	1.28	1.49	1.73	1.94	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
San Antero	1.30	1.55	1.80	2.09	2.42	2.80	3.16	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73
San Bernardo	0.70	0.84	0.97	1.12	1.30	1.51	1.70	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
San Carlos	0.40	0.48	0.55	0.64	0.74	0.86	0.97	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
San Pelayo	0.60	0.72	0.83	0.96	1.12	1.29	1.46	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49
Tierra Alta	3.00	3.58	4.15	4.81	5.58	6.47	7.28	0.70	0.84	0.97	1.12	1.30	1.51	1.70
Valencia	1.10	1.31	1.52	1.77	2.05	2.37	2.67	0.30	0.36	0.42	0.48	0.56	0.65	0.73

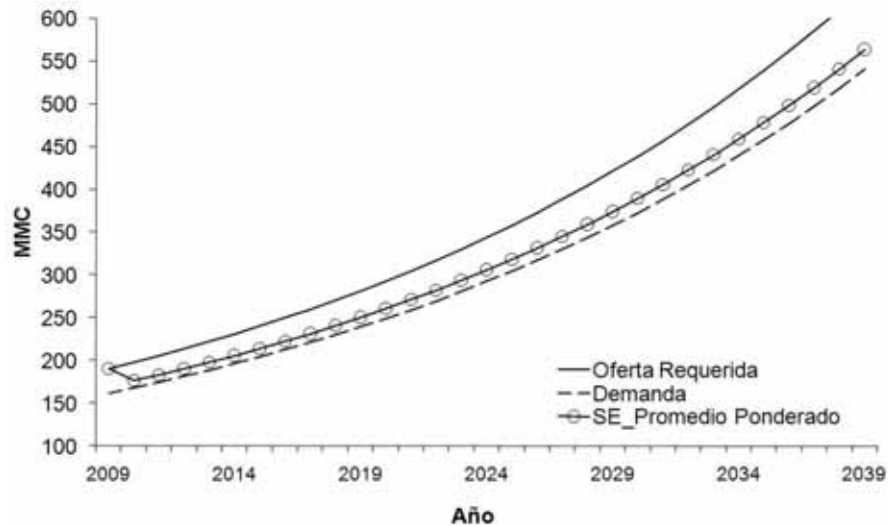
**Tabla 27.** Oferta sectorial requerida por municipio.

Municipio/Año	Oferta Requerida_Urbana							Oferta Requerida_Rural						
	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039
Ayapel	1.49	2.01	2.57	3.29	4.21	5.39	6.57	1.14	1.53	1.96	2.51	3.21	4.11	5.00
Buenvista	0.49	0.66	0.85	1.09	1.39	1.78	2.17	0.63	0.85	1.09	1.39	1.78	2.28	2.78
Canaletes	0.25	0.33	0.43	0.55	0.70	0.90	1.09	0.72	0.96	1.23	1.58	2.02	2.59	3.15
Cereté	3.44	4.62	5.92	7.57	9.69	12.41	15.12	1.90	2.55	3.27	4.18	5.35	6.85	8.34
Ciénaga de Oro	1.52	2.05	2.62	3.35	4.29	5.49	6.69	1.66	2.24	2.87	3.67	4.69	6.01	7.32
Cotorra	0.25	0.33	0.43	0.55	0.70	0.89	1.09	0.60	0.81	1.04	1.33	1.70	2.18	2.66
Chimá	0.21	0.28	0.35	0.45	0.58	0.74	0.90	0.56	0.75	0.96	1.23	1.57	2.01	2.45
Chinú	1.52	2.05	2.62	3.36	4.30	5.50	6.70	1.15	1.55	1.99	2.54	3.25	4.16	5.07
La Apartada	0.73	0.98	1.25	1.60	2.04	2.62	3.19	0.14	0.19	0.25	0.31	0.40	0.51	0.63
Lorica	3.24	4.36	5.58	7.14	9.14	11.70	14.26	3.40	4.57	5.84	7.48	9.57	12.25	14.93
Los Córdoba	0.24	0.32	0.42	0.53	0.68	0.87	1.06	0.75	1.01	1.29	1.65	2.11	2.70	3.29
Momil	0.64	0.86	1.09	1.40	1.79	2.30	2.80	0.28	0.37	0.48	0.61	0.78	1.00	1.22
Montelíbano	3.58	4.81	6.16	7.88	10.09	12.92	15.73	1.25	1.68	2.15	2.75	3.52	4.50	5.49
Montería	20.92	28.13	36.01	46.08	58.99	75.50	91.98	4.76	6.40	8.19	10.49	13.42	17.18	20.93
Moñitos	0.39	0.52	0.67	0.86	1.10	1.41	1.71	0.94	1.27	1.62	2.07	2.65	3.40	4.14
Planetarrica	2.80	3.76	4.81	6.16	7.89	10.10	12.30	1.20	1.62	2.07	2.65	3.40	4.35	5.29
Pto Libertador	0.96	1.08	1.20	1.32	1.46	1.61	1.74	1.13	1.28	1.41	1.56	1.72	1.90	2.05
Pueblo Nuevo	0.82	1.10	1.40	1.80	2.30	2.94	3.59	1.05	1.41	1.81	2.31	2.96	3.79	4.61
Puerto Escondido	0.26	0.35	0.44	0.57	0.73	0.93	1.13	0.94	1.26	1.62	2.07	2.65	3.39	4.14
Purísima	0.45	0.60	0.77	0.99	1.26	1.62	1.97	0.44	0.59	0.76	0.97	1.24	1.59	1.93
Sahagún	3.28	4.42	5.65	7.23	9.26	11.85	14.44	2.20	2.96	3.78	4.84	6.20	7.93	9.66
San Andrés de Sotavento	0.62	0.84	1.07	1.38	1.76	2.25	2.75	2.81	3.78	4.84	6.20	7.93	10.15	12.37
San Antero	1.05	1.41	1.81	2.32	2.97	3.80	4.62	0.60	0.81	1.04	1.33	1.70	2.18	2.65
San Bernardo	0.60	0.80	1.03	1.31	1.68	2.15	2.62	1.20	1.61	2.06	2.64	3.37	4.32	5.26
San Carlos	0.33	0.44	0.57	0.73	0.93	1.19	1.45	0.98	1.32	1.69	2.17	2.77	3.55	4.33
San Pelayo	0.50	0.68	0.87	1.11	1.42	1.82	2.22	1.67	2.24	2.87	3.67	4.70	6.02	7.33
Tierra Alta	2.40	3.23	4.13	5.29	6.77	8.66	10.55	2.36	3.18	4.07	5.21	6.67	8.53	10.40
Valencia	0.90	1.21	1.55	1.99	2.55	3.26	3.97	1.13	1.52	1.95	2.50	3.20	4.09	4.98

Continuación

Municipio/Año	Oferta Requerida_Industrial							Oferta Requerida_Comercial						
	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039	2009	2015	2020	2025	2030	2035	2039
Ayapel	2.12	2.53	2.93	3.40	3.94	4.57	5.14	0.59	0.70	0.81	0.94	1.09	1.27	1.43
Buenavista	0.71	0.84	0.98	1.13	1.31	1.52	1.71	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
Canaletes	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Cereté	5.06	6.04	7.00	8.12	9.41	10.91	12.28	1.29	1.55	1.79	2.08	2.41	2.79	3.14
Ciénaga de Oro	2.24	2.67	3.09	3.59	4.16	4.82	5.43	0.59	0.70	0.81	0.94	1.09	1.27	1.43
Cotorra	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Chimá	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Chinú	2.24	2.67	3.09	3.59	4.16	4.82	5.43	0.59	0.70	0.81	0.94	1.09	1.27	1.43
La Apartada	1.06	1.26	1.47	1.70	1.97	2.28	2.57	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
Lorica	4.71	5.62	6.51	7.55	8.75	10.15	11.42	1.18	1.40	1.63	1.89	2.19	2.54	2.86
Los Córdoba	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Momil	0.94	1.12	1.30	1.51	1.75	2.03	2.28	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
Montelíbano	5.18	6.18	7.17	8.31	9.63	11.16	12.56	1.29	1.55	1.79	2.08	2.41	2.79	3.14
Montería	30.47	36.38	42.18	48.90	56.68	65.71	73.96	7.65	9.13	10.59	12.27	14.23	16.49	18.56
Moñitos	0.59	0.70	0.81	0.94	1.09	1.27	1.43	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Planetarrica	4.12	4.92	5.70	6.61	7.66	8.88	9.99	1.06	1.26	1.47	1.70	1.97	2.28	2.57
Pto Libertador	1.41	1.69	1.95	2.27	2.63	3.04	3.43	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86
Pueblo Nuevo	1.18	1.40	1.63	1.89	2.19	2.54	2.86	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86
Puerto Escondido	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Purísima	0.71	0.84	0.98	1.13	1.31	1.52	1.71	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
Sahagún	4.82	5.76	6.68	7.74	8.97	10.40	11.71	1.18	1.40	1.63	1.89	2.19	2.54	2.86
San Andrés de Sotavento	0.94	1.12	1.30	1.51	1.75	2.03	2.28	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
San Antero	1.53	1.83	2.12	2.45	2.85	3.30	3.71	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86
San Bernardo	0.82	0.98	1.14	1.32	1.53	1.78	2.00	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
San Carlos	0.47	0.56	0.65	0.76	0.88	1.01	1.14	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29
San Pelayo	0.71	0.84	0.98	1.13	1.31	1.52	1.71	0.24	0.28	0.33	0.38	0.44	0.51	0.57
Tierra Alta	3.53	4.21	4.89	5.66	6.57	7.61	8.57	0.82	0.98	1.14	1.32	1.53	1.78	2.00
Valencia	1.29	1.55	1.79	2.08	2.41	2.79	3.14	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.76	0.86

La **Figura 28**, relaciona la demanda total del recurso hídrico (no incluye pérdidas, reuso y manejo en sitios de demanda, por lo tanto es igual para todos los escenarios), la oferta requerida y el suministro entregado de acuerdo al promedio ponderado, para el periodo 2010-2039.



**Figura 28.** Relación de la demanda del recurso hídrico en la Cuenca, oferta requerida y suministro entregado.

Aunque la demanda (540.7 MMC al 2039) se encuentra por debajo del suministro entregado (563.3MMC), es importante anotar que no se satisface al 100% los requerimientos en cada uno de los 28 puntos de demanda y sectores, dado que la demanda no incluye pérdidas en los sistemas, reuso de agua en los procesos, ni manejo en los diferentes sitios de demanda por lo que la oferta requerida (636.1 MMC) es mucho mayor como se observa en la figura.

En este escenario la reducción del caudal promedio anual en la cuenca con relación al actual, sería de 18.8% (lleva implícito escenarios que estiman reducciones hasta del 35%,

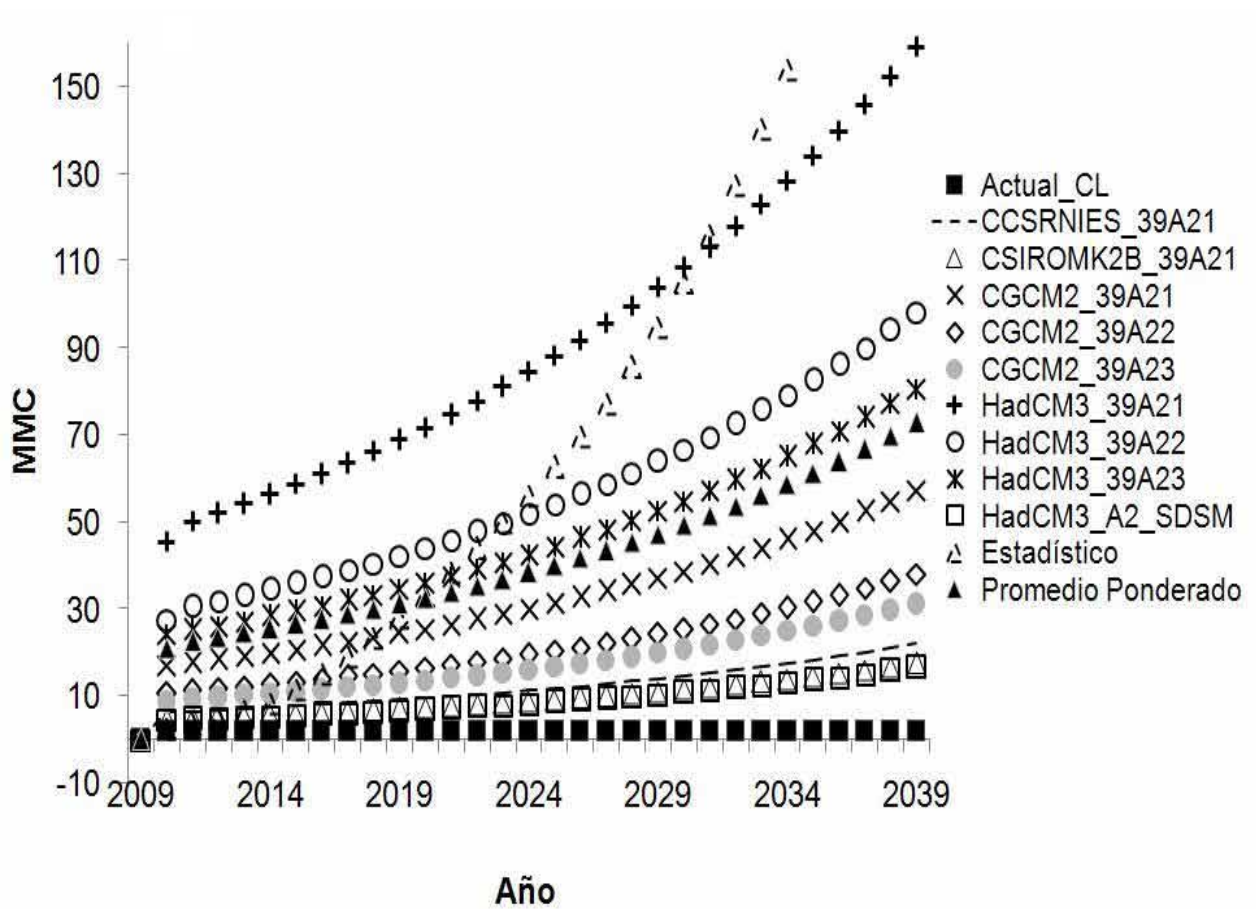
además solo contempla el periodo de análisis del 2010 al 2039, siendo mas severas las estimaciones del 2040 al 2069) el cual debe ser analizado con mucha atención, debido a las implicaciones que este podría tener en la región de estudio, ya que según la Corporación Andina de Fomento (CAF, 2000), en eventos pasados del fenómeno del niño (1997-1998) se han reportado disminuciones hasta del 33% en los caudales del Rio Sinú, trayendo como consecuencia efectos como: grandes pérdidas en la producción agropecuaria y otros sectores económicos, aumento en la demanda de agua y energía, sobre costos en los precios de los recursos para los consumidores, entre otros.

Según la misma institución la cuenca presenta alta grado de deterioro y aridez, además de ser vulnerable ante cambios de las condiciones hidrometeorológicas existentes, debido a fuertes procesos de erosión, actividades antropogénicas, presión sobre los recursos, explotación de sus bosques naturales, perdida de cobertura vegetal y elementos de regulación hídrica. Es importante resaltar que los anteriores factores generan sinergias positivas complejas de analizar.

#### ***4.9.3. Demanda insatisfecha y porcentaje de cobertura.***

Como se puede observar en la **Figura 29**, la demanda insatisfecha (DI) total, es decir en toda la cuenca, va en aumento de acuerdo a las exigencias cada vez mayores y a los cambios climáticos proyectados.





**Figura 29.** Demanda insatisfecha total Cuenca del Sinú\_Caribe.

En la **Tabla 28** y **Tabla 29**, se encuentran el suministro entregado y la demanda insatisfecha municipal proyectados por todos los modelos al año 2039.

**Tabla 28.** *Suministro entregado por municipio, diferentes escenarios al año 2039*

Escenario/Municipio	Ayapel	Buenavista	Canaletes	Cereté	Ciénaga de Oro	Cotorra	Chima	Chinú	La Apartada	Lorica	Los Córdoba	Momil	Montelibano
Actual_CL	5.28	2.05	1.42	11.57	5.95	1.31	1.22	5.45	2.14	12.39	1.45	2.07	11.18
Adaptacion1	16.07	6.41	4.77	34.45	18.48	4.33	3.99	16.51	6.16	38.51	4.87	6.09	32.72
CCSRNIES_39A21	17.51	6.98	5.20	37.53	20.14	4.72	4.34	17.98	6.72	41.96	5.30	6.63	35.65
CGCM2_39A21	16.50	6.58	4.90	35.37	18.98	4.45	4.09	16.95	6.33	39.54	5.00	6.25	33.59
CGCM2_39A22	17.05	6.80	5.06	36.55	19.61	4.59	4.23	17.51	6.54	40.86	5.17	6.46	34.71
CGCM2_39A23	17.25	6.87	5.12	36.97	19.84	4.65	4.28	17.71	6.62	41.33	5.23	6.53	35.11
CSIROMK2B_39A21	17.64	7.03	5.24	37.81	20.29	4.75	4.37	18.12	6.77	42.27	5.34	6.68	35.91
Estadístico	11.47	4.57	3.41	24.59	13.19	3.09	2.84	11.78	4.40	27.49	3.48	4.34	23.35
HadCM3_39A21	13.60	5.42	4.04	29.16	15.64	3.66	3.37	13.97	5.22	32.59	4.12	5.15	27.69
HadCM3_39A22	15.33	6.11	4.55	32.86	17.63	4.13	3.80	15.75	5.88	36.74	4.65	5.81	31.22
HadCM3_39A23	15.83	6.31	4.70	33.94	18.21	4.27	3.93	16.26	6.07	37.94	4.80	6.00	32.23
HadCM3_A2_SDSM	17.66	7.04	5.25	37.86	20.31	4.76	4.38	18.14	6.77	42.32	5.35	6.69	35.96
Promedio Ponderado	16.06	6.40	4.77	34.43	18.47	4.33	3.98	16.50	6.16	38.49	4.87	6.08	32.70

## Continuación

Escenario/Municipio	Montería	Moñitos	Planetarrica	Pto Libertador	Pueblo Nuevo	Puerto Escondido	Purísima	Sahagún	San Andrés de Sotavento	San Antero	San Bernardo	San Carlos	San Pelayo	Tierra Alta	Valencia
Actual_CL	63.15	2.02	9.09	3.82	3.36	1.65	1.69	11.37	4.57	3.50	2.82	1.88	3.08	9.03	3.65
Adaptacion1	<b>163.31</b>	6.70	26.72	7.16	10.55	5.68	5.23	34.26	15.92	10.50	9.27	6.39	10.48	27.92	11.48
CCSRNIES_39A21	198.31	7.30	29.11	7.80	11.50	6.19	5.70	37.32	17.35	11.44	10.09	6.96	11.42	30.42	12.50
CGCM2_39A21	186.88	6.88	27.44	7.35	10.84	5.83	5.37	35.17	16.35	10.78	9.51	6.56	10.76	28.67	11.78
CGCM2_39A22	193.12	7.11	28.35	7.60	11.20	6.03	5.55	36.35	16.89	11.14	9.83	6.77	11.12	29.63	12.18
CGCM2_39A23	195.34	7.19	28.68	7.68	11.33	6.10	5.61	36.77	17.09	11.27	9.94	6.85	11.25	29.97	12.32
CSIROMK2B_39A21	199.77	7.36	29.33	7.86	11.58	6.23	5.74	37.60	17.47	11.52	10.17	7.01	11.50	30.65	12.60
Estadístico	129.91	4.78	19.07	5.11	7.53	4.05	3.73	24.45	11.36	7.49	6.61	4.56	7.48	19.93	8.19
HadCM3_39A21	154.06	5.67	22.62	6.06	8.93	4.81	4.43	29.00	13.48	8.88	7.84	5.40	8.87	23.63	9.71
HadCM3_39A22	173.65	6.39	25.49	6.83	10.07	5.42	4.99	32.68	15.19	10.01	8.84	6.09	10.00	26.64	10.95
HadCM3_39A23	179.32	6.60	26.33	7.05	10.40	5.60	5.15	33.75	15.69	10.34	9.13	6.29	10.33	27.51	11.31
HadCM3_A2_SDSM	200.04	7.37	29.37	7.87	11.60	6.24	5.75	37.65	17.50	11.54	10.18	7.02	11.52	30.69	12.61
Promedio Ponderado	<b>181.92</b>	6.70	26.71	7.16	10.55	5.68	5.23	34.24	15.91	10.49	9.26	6.38	10.48	27.91	11.47

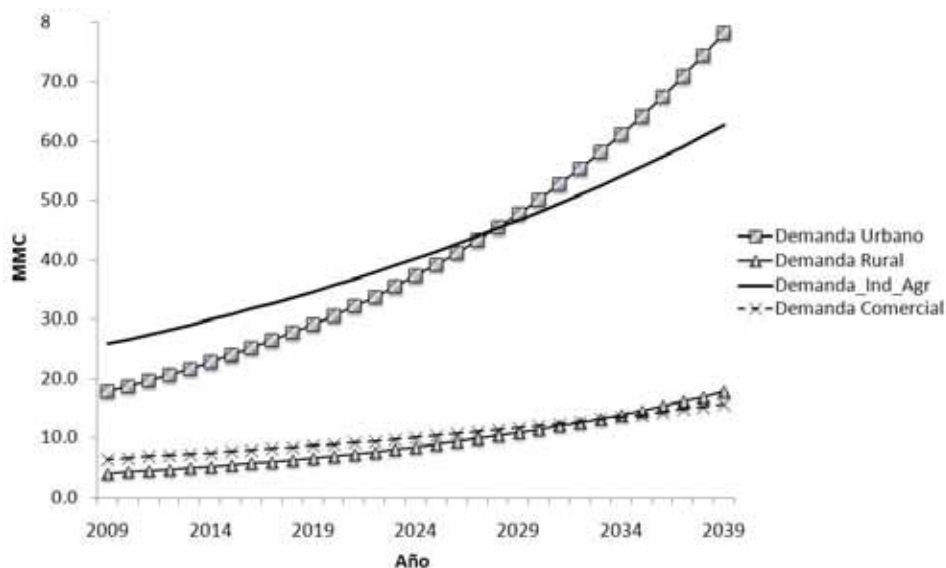
**Tabla 29.** Demanda municipal insatisfecha, diferentes escenarios al año 2039

Escenario/Municipio	Ayapel	Buenavista	Canaletes	Cereté	Ciénaga de Oro	Cotorra	Chima	Chinú	La Apartada	Lorica	Los Córdoba	Momil	Montelibano	Montería
Actual_CL	0.05	0.02	0.01	0.12	0.06	0.01	0.01	0.06	0.02	0.13	0.01	0.02	0.11	0.64
Adaptacion1	2.07	0.82	0.61	4.43	2.38	0.56	0.51	2.12	0.79	4.95	0.63	0.78	4.21	<b>21.01</b>
CCSRNIES_39A21	0.63	0.25	0.19	1.35	0.72	0.17	0.16	0.65	0.24	1.51	0.19	0.24	1.28	7.12
CGCM2_39A21	1.64	0.65	0.49	3.51	1.88	0.44	0.41	1.68	0.63	3.93	0.50	0.62	3.34	18.55
CGCM2_39A22	1.09	0.43	0.32	2.33	1.25	0.29	0.27	1.12	0.42	2.60	0.33	0.41	2.21	12.31
CGCM2_39A23	0.89	0.36	0.26	1.91	1.02	0.24	0.22	0.91	0.34	2.13	0.27	0.34	1.81	10.09
CSIROMK2B_39A21	0.50	0.20	0.15	1.07	0.57	0.13	0.12	0.51	0.19	1.20	0.15	0.19	1.02	5.66
Estadístico	6.67	2.66	1.98	14.29	7.67	1.80	1.65	6.85	2.56	15.98	2.02	2.53	13.58	75.52
HadCM3_39A21	4.54	1.81	1.35	9.72	5.22	1.22	1.12	4.66	1.74	10.87	1.37	1.72	9.24	51.37
HadCM3_39A22	2.81	1.12	0.83	6.01	3.23	0.76	0.70	2.88	1.08	6.72	0.85	1.06	5.71	31.78
HadCM3_39A23	2.31	0.92	0.68	4.94	2.65	0.62	0.57	2.37	0.88	5.52	0.70	0.87	4.69	26.11
HadCM3_A2_SDSM	0.48	0.19	0.14	1.02	0.55	0.13	0.12	0.49	0.18	1.14	0.14	0.18	0.97	5.39
Promedio Ponderado	2.08	0.83	0.62	4.45	2.39	0.56	0.51	2.13	0.80	4.97	0.63	0.79	4.23	<b>23.51</b>

## Continuación

Escenario/Municipio	Moñitos	Planetarrica	Pto Libertador	Pueblo Nuevo	Puerto Escondido	Purísima	Sahagún	San Andrés de Sotavento	San Antero	San Bernardo	San Carlos	San Pelayo	Tierra Alta	Valencia
Actual_CL	0.02	0.09	0.04	0.03	0.02	0.02	0.12	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.09	0.04
Adaptacion1	0.86	3.44	0.92	1.36	0.73	0.67	4.41	2.05	1.35	1.19	0.82	1.35	3.59	1.48
CCSRNIES_39A21	0.26	1.05	0.28	0.41	0.22	0.20	1.34	0.62	0.41	0.36	0.25	0.41	1.09	0.45
CGCM2_39A21	0.68	2.72	0.73	1.08	0.58	0.53	3.49	1.62	1.07	0.94	0.65	1.07	2.85	1.17
CGCM2_39A22	0.45	1.81	0.48	0.71	0.38	0.35	2.32	1.08	0.71	0.63	0.43	0.71	1.89	0.78
CGCM2_39A23	0.37	1.48	0.40	0.59	0.31	0.29	1.90	0.88	0.58	0.51	0.35	0.58	1.55	0.64
CSIROMK2B_39A21	0.21	0.83	0.22	0.33	0.18	0.16	1.07	0.50	0.33	0.29	0.20	0.33	0.87	0.36
Estadístico	2.78	11.09	2.97	4.38	2.36	2.17	14.21	6.61	4.36	3.84	2.65	4.35	11.59	4.76
HadCM3_39A21	1.89	7.54	2.02	2.98	1.60	1.48	9.67	4.49	2.96	2.62	1.80	2.96	7.88	3.24
HadCM3_39A22	1.17	4.67	1.25	1.84	0.99	0.91	5.98	2.78	1.83	1.62	1.11	1.83	4.88	2.00
HadCM3_39A23	0.96	3.83	1.03	1.51	0.81	0.75	4.91	2.28	1.51	1.33	0.92	1.50	4.01	1.65
HadCM3_A2_SDSM	0.20	0.79	0.21	0.31	0.17	0.15	1.01	0.47	0.31	0.27	0.19	0.31	0.83	0.34
Promedio Ponderado	0.87	3.45	0.92	1.36	0.73	0.68	4.43	2.06	1.36	1.20	0.82	1.35	3.61	1.48

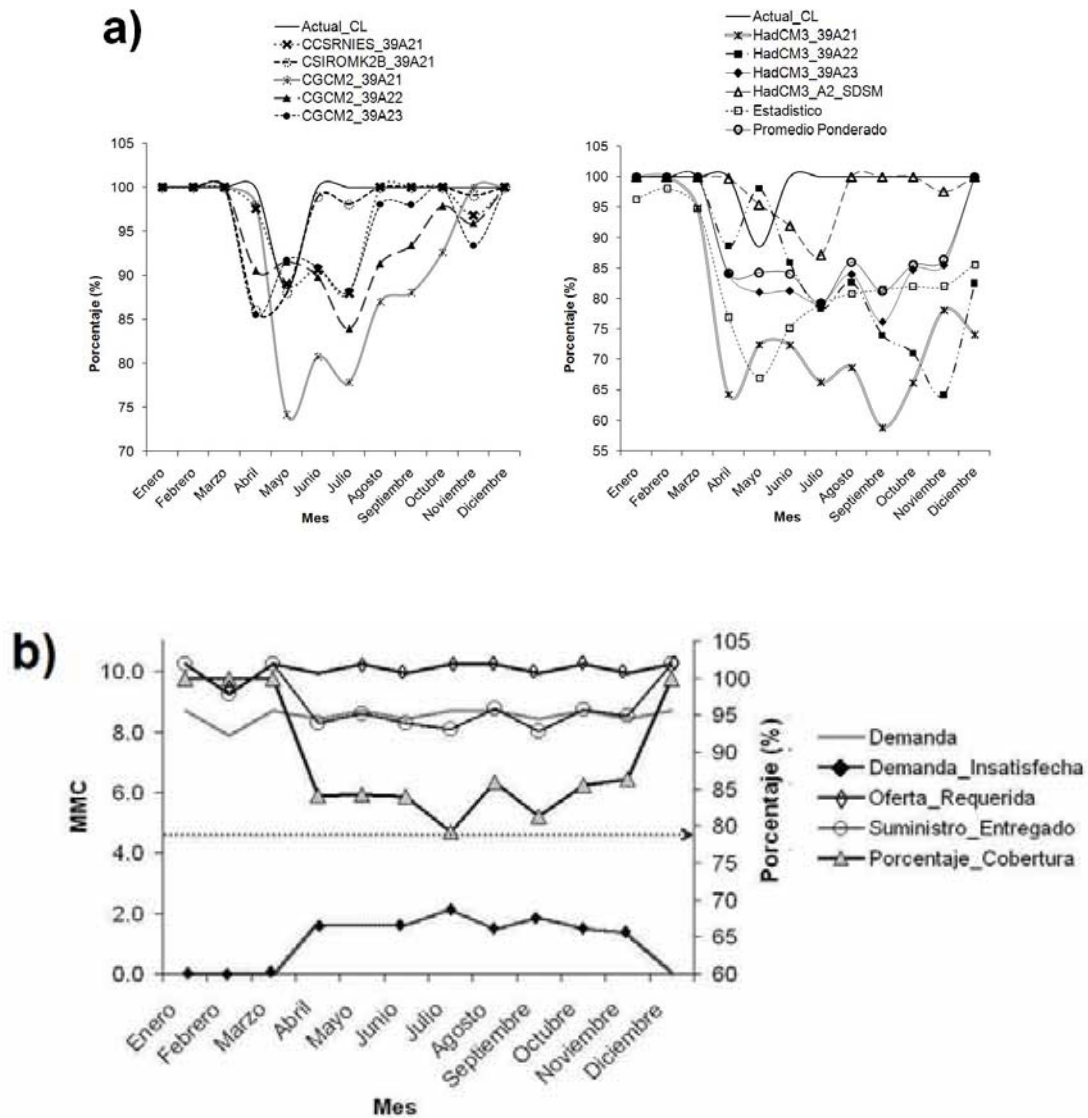
Para ilustrar y poder tener una interpretación más detallada de los posibles efectos del desequilibrio entre la oferta y la demanda, se analiza uno de los principales centros de demanda como es Montería, en el escenario promedio ponderado (*Figura 30*).



*Figura 30.* Demanda sectorial en Montería, periodo 2010-2039.

En el caso particular de Montería la mayor demanda de agua se da en la zona urbana y los procesos industriales (agropecuarios), seguido por la población rural y el comercio, así: zona urbana 17.8 MMC, industria 25.9 MMC, población rural 4.0 MMC y comercio 6.5 MMC al inicio del periodo (2009), y 78.2, 62.9, 17.8 y 15.8 MMC respectivamente al finalizar el periodo de análisis (2039).

El porcentaje promedio mensual de cobertura de la demanda para el periodo y los escenarios analizados se presenta en la **Figura 31a**. Teniendo en cuenta el escenario promedio ponderado se presenta las diferentes variables de la relación oferta\_demanda encontradas para el municipio de Montería (**Figura 31b**).



**Figura 31.** a) Cobertura de la demanda periodo 2010-2039. b) Relación oferta\_demanda en Montería y sus correspondientes variables, escenario promedio ponderado.

En la **Figura 31a** se observa que la cobertura de la demanda no es total en ninguno de los escenarios. La demanda promedio mensual en Montería es de 8.6 MMC, la cual requiere de una oferta mensual de aproximadamente 10.1 MMC, el suministro entregado es variable mes a mes alcanzando un mínimo de 8.0 MMC en Septiembre y esta estrechamente relacionado con el aporte de caudal proyectado, el porcentaje de cobertura igualmente es variable, presentándose la menor cobertura en el mes de Julio con 79.3% (**Figura 31b**).

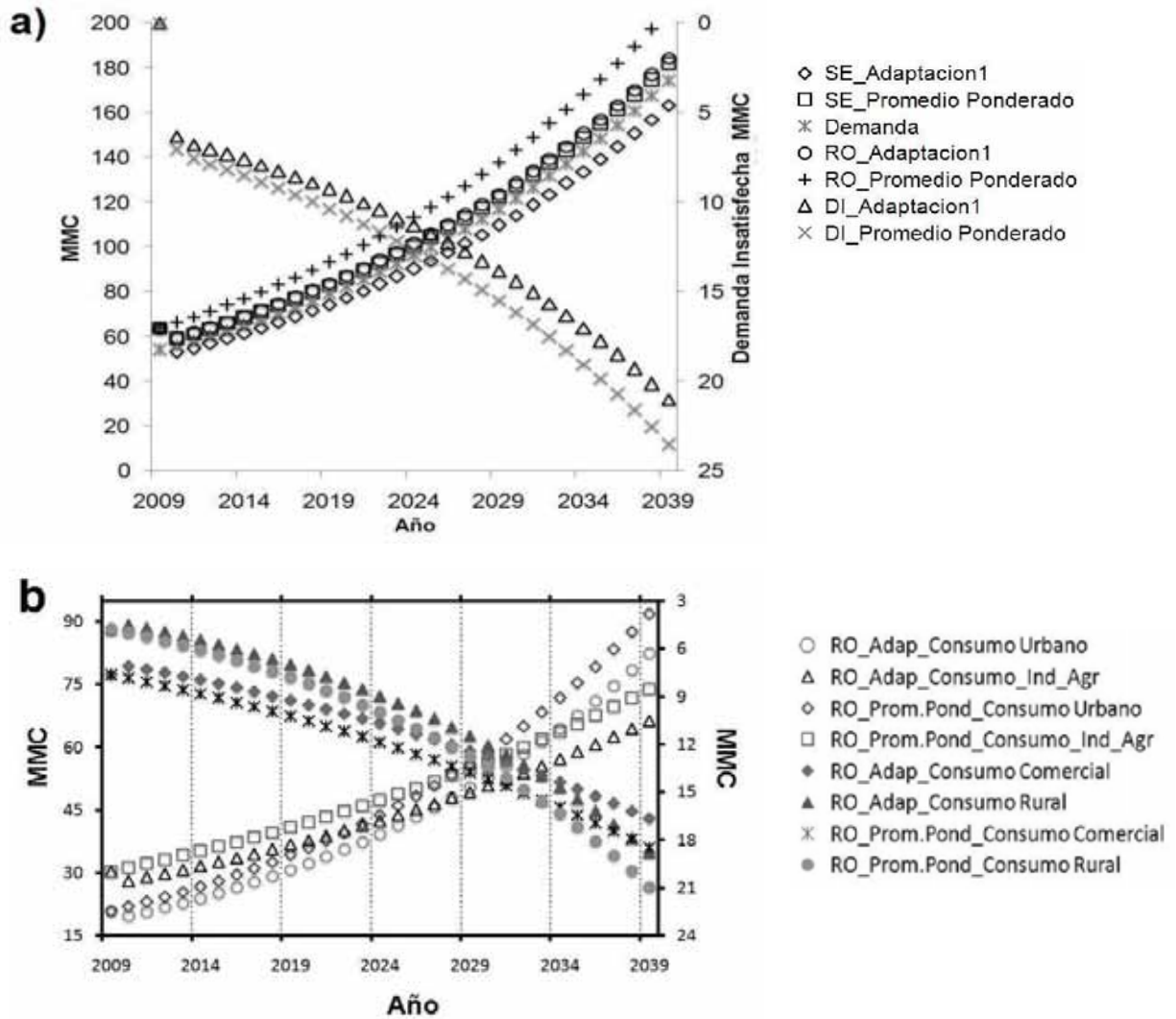
#### ***4.9.4. Incorporación de estrategias de manejo y adaptación.***

Continuando con el ejemplo anterior, se asumen posibles cambios viables en cuanto al uso eficiente del agua, disminución en pérdida de los sistemas, reuso o incorporación de aguas servidas en la industria, instalación de accesorios más eficientes, entre otros.

Los cambios realizados (denominado escenario adaptación1) solo para el Municipio de Montería fueron: consumo, el cual pasa de 35% a 30%, perdidas en los sistemas de 15% a 10%, y un reuso del 5%. Este nuevo escenario es heredado del promedio ponderado, por lo que se conservan las demás variables e incluye los potenciales cambios climáticos proyectados por el mismo, para efecto de las subsiguientes comparaciones.

Los anteriores cambios implicarían una reducción de la oferta requerida al final del periodo para toda la Cuenca de 21.1 MMC al pasar de 636.1 MMC en el escenario promedio ponderado a 615 MMC en el escenario adaptacion1, disminución del SE y demanda no satisfecha de 18.4 MMC y 2.7 MMC respectivamente.

La comparación del RO, el SE y la DI total en Montería se presenta en la **Figura 32a**. La oferta requerida anual por sector se presenta en la **Figura 32b**, para ambos escenarios.



**Figura 32.** a) Relación oferta\_demanda total Municipio de Montería. b) Comparación oferta requerida por sector, escenarios promedio ponderado y adaptación1.

La oferta requerida para los sectores rural y comercial se lee en el eje vertical de la derecha.

En las figuras se observa como el SE total en Montería para el 2039 pasa de 181.9 MMC del escenario promedio ponderado a 163.3 MMC en el escenario adaptación1, presentando una reducción de 18.6 MMC, disminución de la DI y del RO de 2.5 MMC (pasa de 23.5MMC a 21.0 MMC) y 21.1 (pasa de 205.4 MMC a 184.3 MMC) respectivamente, lo cual es reflejado en toda la cuenca como se especifico anteriormente (Ver *Tabla 28* y *Tabla 29*).

La oferta requerida por sector muestra importantes disminuciones al incluir los cambios de manejo y adaptación como se puede observar en la *Figura 32b*. Para el año 2039 la oferta requerida se reduce de la siguiente forma: comercio, 1.8 MMC; zona rural, 2.1 MMC; zona urbana, 9.5 MMC e industria, 7.5 MMC.

En la *Figura 33*, se ilustra la comparación de los promedios mensuales de las principales variables de la relación oferta\_demnada en el Municipio de Montería.

Como se puede observar en la figura, el escenario adaptacon1 presenta disminución en la oferta requerida, el suministro entregado y la demanda insatisfecha analizadas mes a mes respecto al promedio ponderado.

En este punto es importante resaltar que las estrategias de manejo y adaptación son de gran importancia y disminuyen la presión sobre los recursos hídricos al ser menores los requerimientos de la oferta, el suministro entregado y la demanda insatisfecha, como se observa en la anterior comparación.



### Relación Oferta-Demanda\_Promedio Ponderado Vs Adaptación\_Municipio de Montería

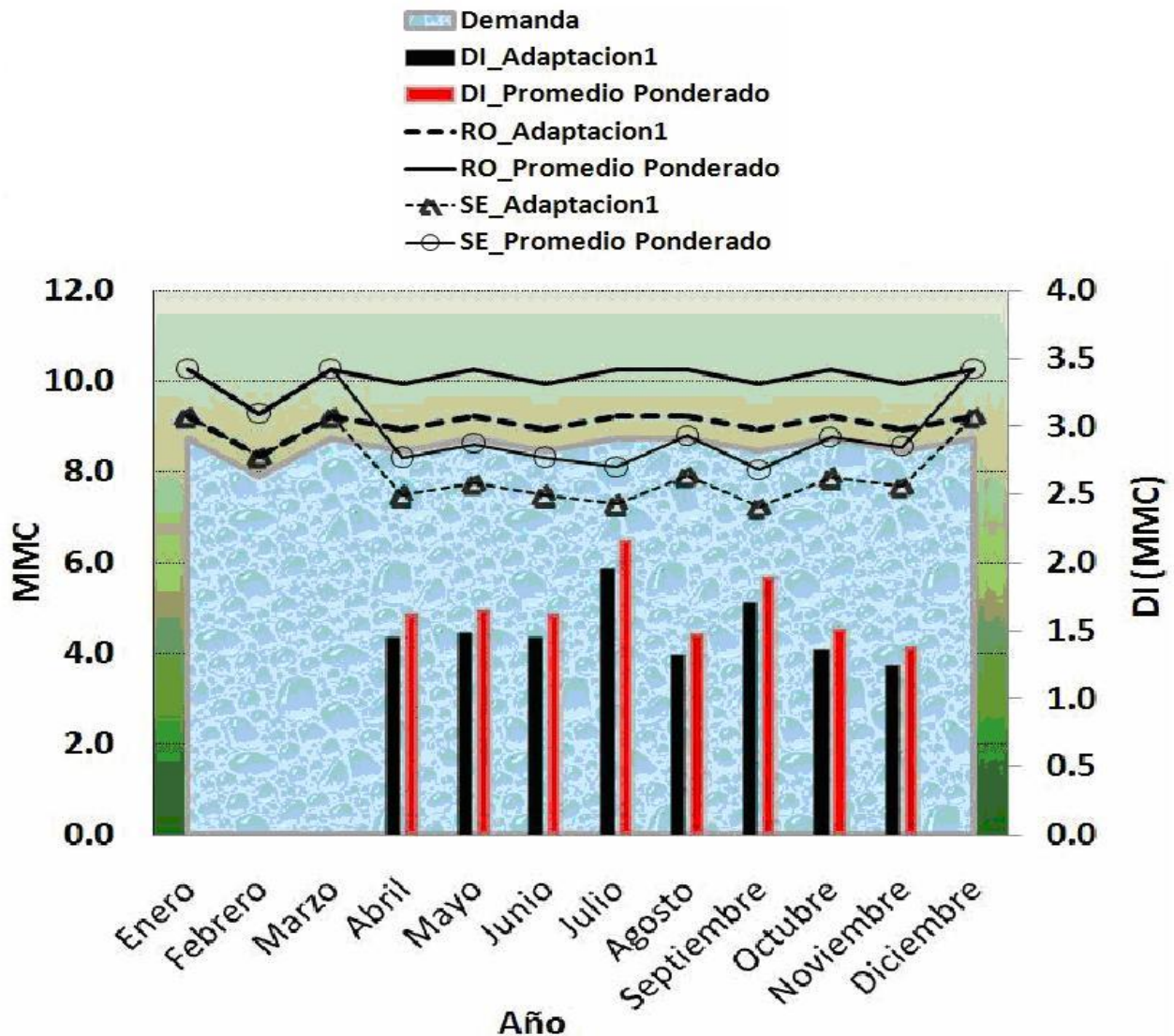


Figura 33. Comparación escenario promedio ponderado y adaptacion1, periodo 2010-2039.

Como se ha venido observando el recurso hídrico se puede convertir en un *factor limitante* ( $K$ ) en la región, al momento de cubrir las necesidades de la población, sectores económicos y actividades productivas proyectadas, condición que será más aguda de acuerdo a los cambios climáticos estimados.

Por tal razón, a continuación se presenta el análisis de la influencia en el tiempo que pueda tener la oferta hídrica actual y bajo cambio climático como factor limitante, en algunas variables de la relación oferta\_demanda en la región.

#### ***4.10. Recurso hídrico como factor limitante.***

Como se menciona anteriormente el caudal extraíble de una Cuenca para Colombia se establece en un 10% de la oferta neta, por lo que en la actualidad sería de 1,664.2 MMC y de 1,350.7 MMC bajo cambio climático proyectado del 2010 al 2039 (Ver **Tabla 24**, escenario actual y proyectado), es decir los valores de ***Ka*** y ***Kcc*** respectivamente y el máximo SE posible.

Con los valores del RO y SE obtenidos a partir del WEAP se ajustaron modelos, con el propósito de tener una mayor proyección en el tiempo, los modelos seleccionados fueron:

$$RO = 188.7e^{0.04t} \quad (4.3)$$

$$SE = 0.288t^2 + 4.024t + 179.0 \quad (4.4)$$

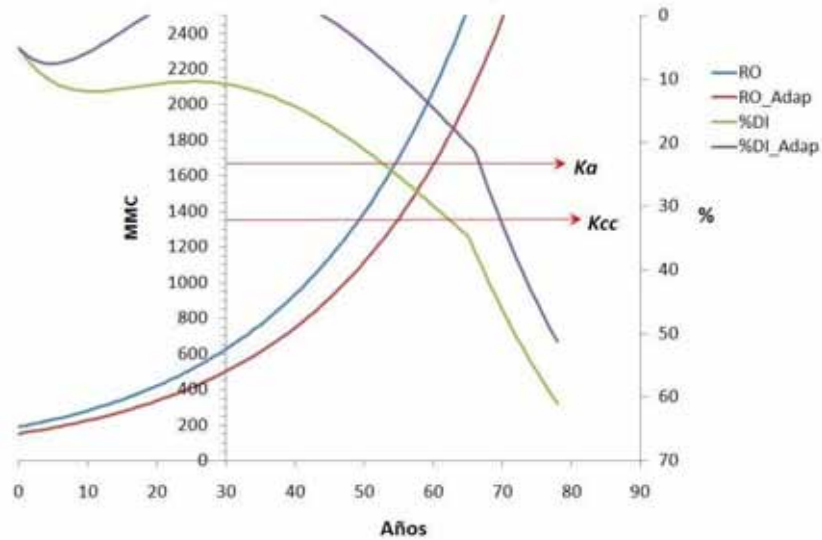
Ambos modelos presentan un buen ajuste y un  $R^2$  del 99.9%, los valores proyectados se presentan en el **ANEXO VIII**, el porcentaje de la demanda insatisfecha se calculó teniendo en cuenta que el RO es la demanda real y el SE es la cobertura de la misma.

Es importante notar que las ecuaciones sugieren algunas formas de modificar las proyecciones:

- una cambiando las condiciones iniciales de la demanda y por lo tanto del suministro, lo cual se podría hacer mediante regulaciones, mayor eficiencia en la infraestructura de suministro y retorno, estrategias de manejo y uso del recurso, cambio en las prioridades, entre otros y
- otra, modificando las tasas de cambio, lo cual es posible interviniendo o actuando sobre las proyecciones de las diferentes variables que intervienen en la demanda como el crecimiento poblacional, incrementos en uso doméstico, agrícola, comercial.

La **Figura 34**, representa la relación de la oferta requerida y la demanda insatisfecha teniendo en cuenta los factores límites del recurso y las condiciones iniciales actuales, igualmente se presenta un escenario nombrado adaptación, en el cual se reduce en un 20% la condición inicial de la oferta requerida, que conlleva a una reducción igual del SE.

Al seguir la curva referente al requerimiento de la oferta actual (RO), se encuentra que la demanda insatisfecha aumenta conforme esta se acerca a los factores límites, el  $K_{cc}$  se alcanzaría en las proximidades del año 2059 y el  $K_a$  en el 2064, es decir la oferta requerida se igualaría al máximo de agua disponible aproximadamente 5 años antes por el efecto del cambio climático, igualmente se observa que el punto de intersección del RO con los  $K_s$ , indican el inicio de un marcado aumento de la DI.



**Figura 34.** Factor limitante para la proyección oferta requerida\_demanda insatisfecha.

El 0 del eje horizontal de la grafica corresponde a la condición actual (2009).

Al disminuir la condición inicial de la oferta requerida en un 20%, se observa un desplazamiento de la misma hacia la derecha (RO\_Adap) de aproximadamente 5 años en los puntos de intersección, y una disminución importante en la DI, contrarrestando y mejorando de alguna forma los efectos del cambio climático (*Tabla 30*).

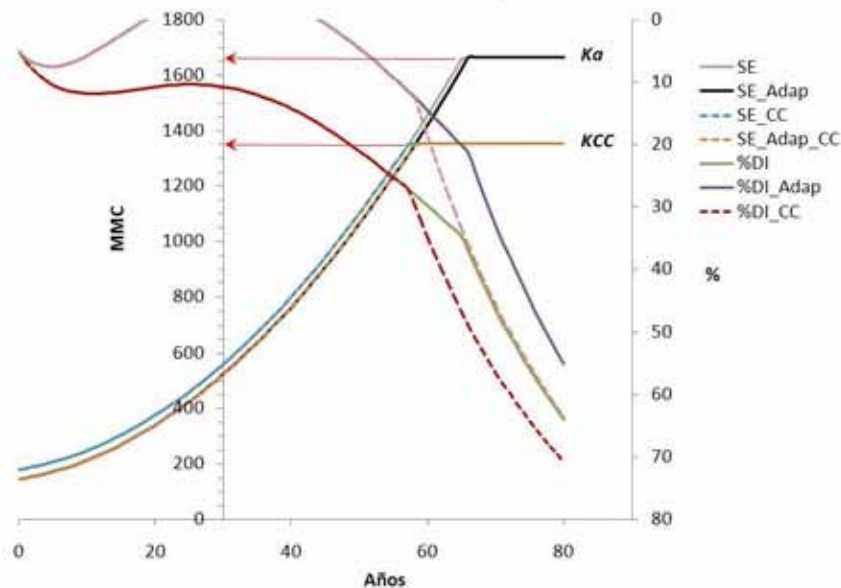
**Tabla 30.** Resumen del efecto del cambio climático en el tiempo sobre RO y DI.

Fac. limite/Variable	Año de intersección		Demanda Insatisfecha (DI) %	
	OR	OR_Adap	OR	OR_Adap
Kcc*	2059	2064	21.1	4.6
Ka*	2064	2069	25.4	9.3

\*Se asumen constantes para efectos de las correspondientes comparaciones, sin embargo las proyecciones climáticas indican efectos mucho mas adversos conforme transcurre el tiempo en la región, por lo tanto los factores limites serian cada vez menores estableciendo a su vez nuevas condiciones o escenarios de análisis.

Similar comportamiento de la DI que el anterior, se observa cuando el SE, se acerca a los factores limites determinados, puntos donde la DI verdaderamente empieza a aumentar a un ritmo mucho mas acelerado.

Como se puede observar en la **Figura 35** el SE es muy similar en ambos escenarios y tienden a converger en el tiempo, pero la diferencia en la DI es significativa.



**Figura 35.** Factor limitante para la proyección suministro entregado\_demanda insatisfecha.

Siguiendo las curvas del SE, se encuentra que en las condiciones actuales el  $Ka$  se alcanzaría en las proximidades del año 2074, siendo en este punto la DI en los escenarios actual y de adaptación de **34.8 % y 20.2 %** respectivamente y donde se acelera el aumento de la DI, mientras que al  $Kcc$  se llegaría aproximadamente en el 2066 (8 años antes), presentando una DI en el escenario actual de 27.1 % y en adaptación de 11.4, si de este punto en adelante el SE se hace constante ( $Kcc$ ) y por lo tanto el aumento de la DI se acelera, al 2074 se tendría

una DI *de 46.8 % y 33.6 %* en los escenarios actual y adaptación respectivamente, es decir se superan los valores encontrados en condiciones actuales (Ver *Tabla 31*)

**Tabla 31.** Resumen del efecto del cambio climático en el tiempo sobre SE y DI.

Fac. limite/Variable	SE	Demanda Insatisfecha (DI)			
		Año intersección	DI%_Ka*	DI%_Kcc**	DI_Adap%_Ka
Kcc	2066	27.1	27.1	11.4	11.4
Ka	2074	<b>34.8</b>	<b>46.8</b>	<b>20.2</b>	<b>33.6</b>

\*El SE se hace permanecer constante una vez llega a *Ka*.

\*\*El SE se hace permanecer constante una vez llega a *Kcc*

De acuerdo a los estudios realizados por el Ideam, el índice de escasez (I.E.) se puede calcular obteniendo la relación porcentual de la demanda respecto a la oferta, para lo cual en esta investigación el requerimiento de la oferta (RO) se asume como la demanda real y la oferta natural actual y proyectada bajo cambio climático sería el *Ka* y *Kcc*, respectivamente. Los resultados de esta relación en porcentaje (%) se encuentran en la *Tabla 32*.

Según la misma institución se pueden determinar 5 categorías para esta relación así: No significativo (< 1%, demanda no significativa con relación a la oferta), mínimo (1-10%, demanda muy baja con respecto a la oferta), medio (11-20%, demanda baja con respecto a la oferta), medio alto (21-50%, demanda apreciable) y Alto (> 50%, demanda alta con respecto a la oferta), como se especificó en párrafos anteriores (Ver **ANEXO III**).

**Tabla 32.** Evolución del IE en el tiempo.

Año/Esc.	Índice de escasez <sup>a</sup>		Índice de escasez bajo Cambio Climático <sup>b</sup>	
	Esc._Actual <sup>c</sup>	Esc._Adap <sup>d</sup>	Esc._Actual	Esc._Adap
2009	11.3	9.1	14.0	11.2
2010	11.8	9.4	14.5	11.6
2011	12.3	9.8	15.1	12.1
2012	12.8	10.2	15.8	12.6
2013	13.3	10.6	16.4	13.1
2014	13.8	11.1	17.1	13.7
2015	14.4	11.5	17.8	14.2
2016	15.0	12.0	18.5	14.8
2017	15.6	12.5	19.2	15.4
2018	16.3	13.0	<b>20.0</b>	16.0
2019	16.9	13.5	20.8	16.7
2020	17.6	14.1	21.7	17.4
2021	18.3	14.7	22.6	18.1
2022	19.1	15.3	23.5	18.8
2023	<b>19.9</b>	15.9	24.5	19.6
2024	20.7	16.5	25.5	<b>20.4</b>
2025	21.5	17.2	26.5	21.2
2026	22.4	17.9	27.6	22.1
2027	23.3	18.6	28.7	23.0
2028	24.2	19.4	29.9	23.9
2029	25.2	<b>20.2</b>	31.1	24.9
2030	26.3	21.0	32.4	25.9
2031	27.3	21.9	33.7	27.0
2032	28.5	22.8	35.1	28.1
2033	29.6	23.7	36.5	29.2
2034	30.8	24.7	38.0	30.4
2035	32.1	25.7	39.5	31.6
2036	33.4	26.7	41.1	32.9
2037	34.8	27.8	42.8	34.3
2038	36.2	28.9	44.6	35.7
2039	37.6	30.1	46.4	37.1
2040	39.2	31.4	48.3	38.6
2041	40.8	32.6	<b>50.2</b>	40.2
2042	42.4	34.0	52.3	41.8
2043	44.2	35.4	54.4	43.6
2044	46.0	36.8	56.7	45.3
2045	47.9	38.3	59.0	47.2
2046	<b>49.8</b>	39.9	61.4	<b>49.1</b>
2047	51.8	41.5	63.9	51.1
2048	54.0	43.2	66.5	53.2
2049	56.2	44.9	69.2	55.4
2050	58.5	46.8	72.0	57.6
2051	60.8	48.7	75.0	60.0
2052	63.3	<b>50.7</b>	78.0	62.4

<sup>a</sup> Cálculo realizado con la oferta igual a  $Ka$ .

<sup>b</sup> Cálculo realizado con la oferta igual a  $Kcc$ .

<sup>c</sup> Se refiere a la demanda real o (RO) Actual.

<sup>d</sup> Se refiere a la demanda o (RO) considerando la estrategia de adaptación.

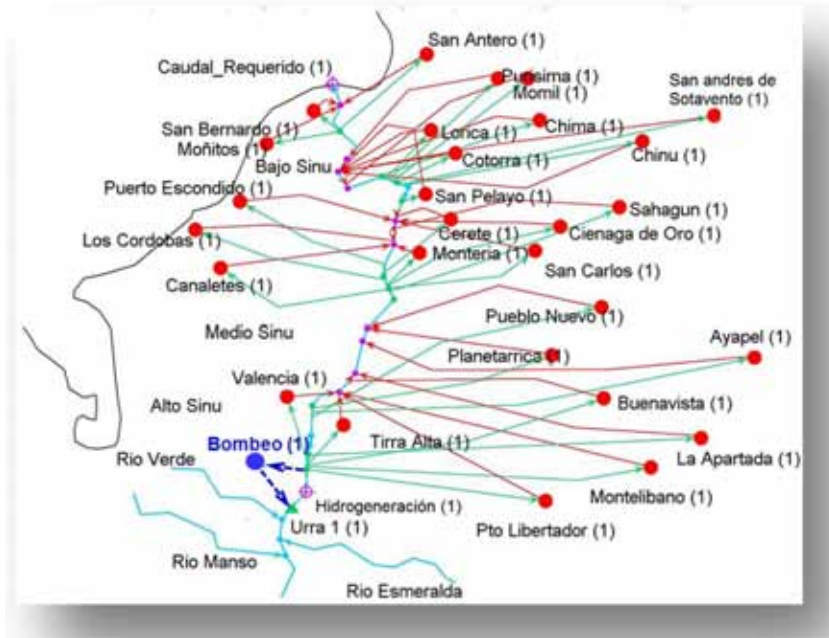
Al 2001 el I.E. en la Cuenca estaba clasificado en la categoría mínimo, es decir se encontraba entre 0 y 10%; de acuerdo a los valores mostrados en la tabla, en la actualidad se estaría pasando a la categoría bajo aproximadamente hasta el 2023 y 2018 en el escenario actual a *ka* y *kcc* respectivamente, y hasta el 2029 y 2024 en el escenario adaptación (en la tabla datos en negrilla), años donde el índice comenzaría a ser catalogado medio alto, hasta alcanzar la mayor categoría aproximadamente en la década de los cuarenta (datos en negrilla y cursiva de la tabla), comportamiento similar a lo encontrado en el análisis del I.P.

#### ***4.11. Efectos de la optimización de generación de energía hidroeléctrica sobre la relación oferta\_demanda en la Cuenca del Sinú\_Caribe.***

En este punto se generan diferentes escenarios, con el propósito de mitigar y/o mejorar los efectos negativos proyectados en la generación de energía y la influencia de dichas estrategias sobre la demanda insatisfecha en la región, interviniendo específicamente los meses más críticos (Febrero-Abril) como se pudo analizar y observar en la ***Figura 24***.

Para lograr el anterior propósito se genera un nuevo sitio de demanda denominado “Bombeo”, el cual tiene como función extraer agua de la fuente aguas abajo de la presa y suministrarla aguas arriba o en el sitio de presa (***Figura 36***).





**Figura 36.** Ubicación sitio de Bombeo.

Los escenarios generados son heredados del promedio ponderado, teniendo en cuenta diferentes cantidades de agua a recircular en tres meses y diferentes fechas de inicio del bombeo. Los criterios adoptados para estimar la cantidad de agua a bombear fue la diferencia entre los caudales actuales y los proyectados en el escenario promedio ponderado de los tres meses más críticos ( $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ), además de observar el efecto de un volumen mayor ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a la diferencia anteriormente mencionada y una pérdida en el proceso del recurso hídrico del 10% (**Tabla 33**).

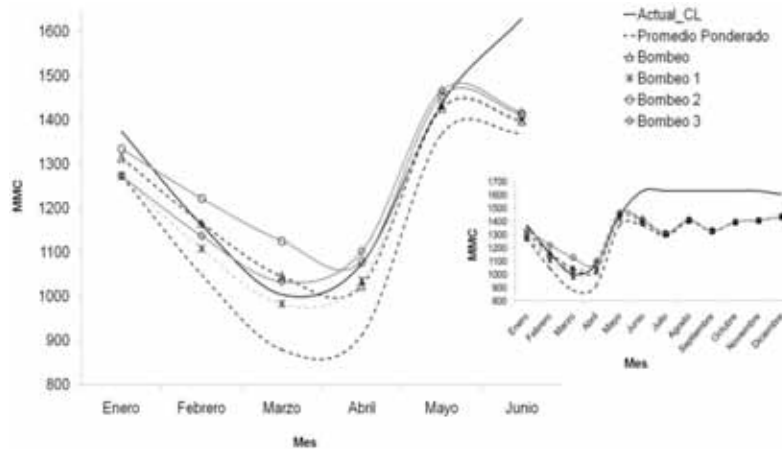
**Tabla 33.** Valores para la generación de escenarios de optimización de la generación de energía eléctrica.

Mes/Esc.	Caudal ( $100 \text{ m}^3/\text{s}$ )		Caudal $150 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
	Bombeo (%) <sup>‡</sup>	Bombeo 1 (%) <sup>†</sup>	Bombeo 2 (%) <sup>‡</sup>	Bombeo 3 (%) <sup>†</sup>
Enero	20	0	20	0
Febrero	40	26.4	40	26.4
Marzo	40	28.5	40	28.5
Abril	0	45.1	0	45.1

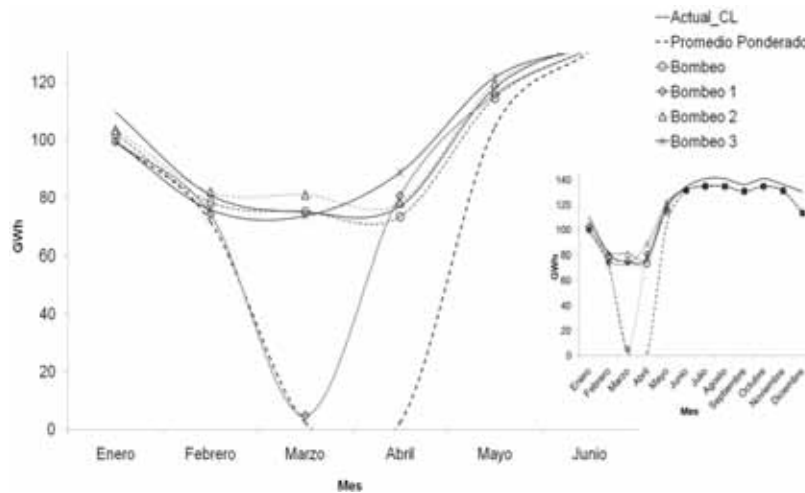
<sup>†</sup> Porcentaje real de las diferencias de caudales.

<sup>‡</sup> Porcentajes hipotéticos del caudal a bombear.

En las *Figuras 37* y *38* se observa claramente la mejora substancial del volumen almacenado en presa y la consecuente generación de energía. Al observar con detalle los escenarios denominados bombeo y bombeo 1, se evidencia que el inicio de la actividad y el porcentaje o la cantidad de agua bombeada son de fundamental importancia, sugiriendo a la vez la alta sensibilidad de la generación eléctrica ante el cambio en el volumen almacenado en presa, de donde se desprende que el volumen almacenado no debe dejarse llegar a niveles críticos para la generación y el bombeo se debe iniciar antes de dichos niveles.



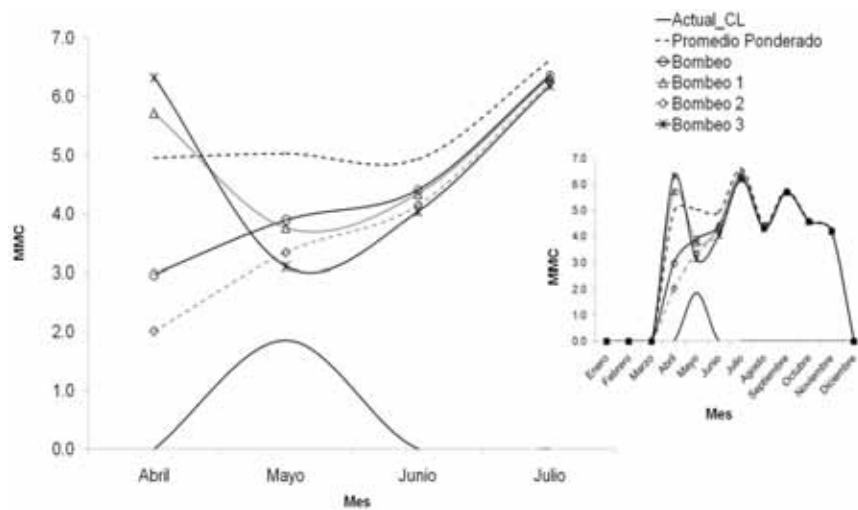
*Figura 37.* Volumen almacenado en presa bajo escenarios de adaptación y/o mitigación.



*Figura 38.* Generación eléctrica bajo escenarios de adaptación y/o mitigación.

El efecto de los anteriores escenarios sobre la demanda insatisfecha en la cuenca se presenta en la **Figura 39**; todos los escenarios presentan una disminución de esta variable, especialmente aquellos donde el bombeo se inicia en enero, es importante anotar que en este caso el nuevo sitio de demanda (bombeo) se comporta como un regulador de caudales, además podría cumplir una segunda función de extracción de agua a otro lugar ante eventos extremos de precipitación en algunos meses, los cuales podrían ir en aumento según lo proyectado (Ver **Figura 15**), evitando muchos desastres aguas abajo, como ya han sucedido.

También es importante resaltar que en diferentes escenarios que no son presentados donde el bombeo es superior a  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , la DI empieza a aparecer donde no existe (Enero-Abril) y a incrementar de forma importante respecto al escenario promedio ponderado, aunque la generación eléctrica sea mayor y registre valores incluso superiores a los actuales, lo que debe ser analizado con más detalle pues podría dar inicio o potenciar diversos conflictos sectoriales.



**Figura 39.** DI en la Cuenca teniendo en cuenta los escenarios de optimización de generación eléctrica.

La *Tabla 34* y *Figura 40*, presenta e ilustran los cambios promedios anuales en la generación eléctrica, volumen almacenado en presa y demanda insatisfecha en la Cuenca, bajo los escenarios de optimización de energía para el periodo 2010-2039.

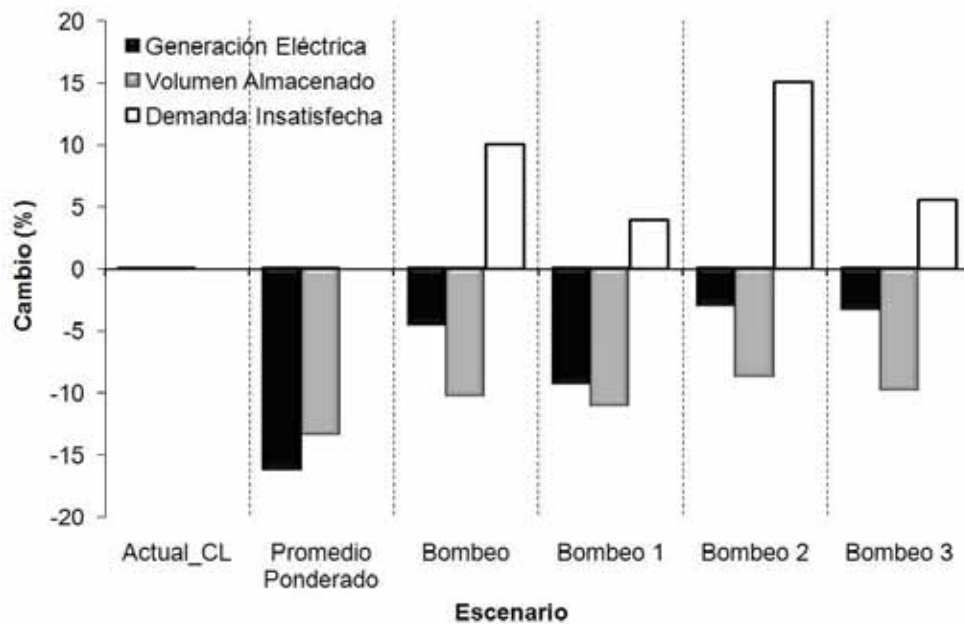
**Tabla 34.** Resumen de los cambios en generación eléctrica, volumen almacenado y demanda insatisfecha.

Escenario/Var.	Generación Eléctrica			Volumen Almacenado			Demanda Insatisfecha	
	GWh/año	% Cambio <sup>†</sup>	% Cambio <sup>‡</sup>	MMC	% Cambio <sup>†</sup>	% Cambio <sup>‡</sup>	MMC	% cambio <sup>♦</sup>
Actual_CL	1418.9	0.0	19.3	1452.7	0.0	15.4	1.9	-
Promedio Ponderado	<b>1189.1</b>	<b>-16.2</b>	<b>0.0</b>	<b>1258.6</b>	<b>-13.4</b>	<b>0.0</b>	<b>40.6</b>	<b>0.0</b>
Bombeo	1354.1	-4.6	13.9	1304.2	-10.2	3.6	36.5	10.1
Bombeo 1	1285.9	-9.4	8.1	1292.9	-11.0	2.7	39.0	4.0
Bombeo 2	<b>1375.6</b>	<b>-3.1</b>	<b>15.7</b>	<b>1326.4</b>	<b>-8.7</b>	<b>5.4</b>	<b>34.5</b>	<b>15.1</b>
Bombeo 3	1371.2	-3.4	15.3	1310.4	-9.8	4.1	38.4	5.5

<sup>†</sup>Cálculo realizado respecto al escenario actual.

<sup>‡</sup>Cálculo realizado respecto al escenario promedio ponderado.

<sup>♦</sup>Cálculo realizado respecto al escenario promedio ponderado, presentado con signo invertido para una mejor visualización de la mejora en la DI.



**Figura 40.** Cambios en generación eléctrica, volumen almacenado y demanda insatisfecha.

De acuerdo con lo anterior el mejor escenario sería el denominado bombeo 2, el cual presenta una disminución respecto al escenario actual, de solo 3.1 % y 8.7 % en generación

eléctrica y volumen almacenado respectivamente y una importante disminución de 15.1 % de la DI respecto al escenario promedio ponderado.

#### **4.11.1. Análisis costo/beneficio de la aplicación de alternativas de optimización.**

A continuación se estima de forma sucinta la relación de costos/beneficios de la aplicación de las diferentes alternativas de adaptación propuestas, para lo cual se tiene en cuenta el costo de administración, operación y manejo (AOM) estimado al 2010 (\$ 9,805,000,000.00), el costo unitario de producción de energía hidroeléctrica (51.3 \$/KWh), el precio promedio en bolsa (88.4 \$/KWh), la generación hidroeléctrica actual y proyectada del 2010 al 2039, la disminución de la demanda insatisfecha aguas abajo de la presa, teniendo en cuenta el precio del m<sup>3</sup> al consumidor (1,270.4 \$/m<sup>3</sup>).

La **Tabla 35** presenta los costos de producción, precios en bolsa y lo que se deja de percibir por los efectos del cambio climático esperado y de acuerdo a las alternativas de adaptación propuestas, en pesos colombianos de hoy. Es importante anotar que la T.R.M. Dólar a la fecha se encuentra en \$ 2,160.08.

**Tabla 35.** Variables económicas relacionadas a los efectos del cambio climático y alternativas propuestas en la generación de energía en Urrá 1.

Escenario/Var.	GWh/año	Cost. Prod.	Prec. Bols.	No se Percibe
Actual_CL	1418.9	72,788,829,972.09	125,429,484,786.21	-
Promedio Ponderado	1189.1	61,000,593,032.48	105,116,031,658.31	<b>20,313,453,127.90</b>
Bombeo	1354.1	69,465,657,649.25	119,703,004,604.17	5,726,480,182.04
Bombeo 1	1285.9	65,968,367,890.89	113,676,485,800.28	11,752,998,985.93
Bombeo 2	1375.6	70,568,125,813.79	121,602,774,306.80	<b>3,826,710,479.41</b>
Bombeo 3	1371.2	70,341,808,152.04	121,212,784,417.94	4,216,700,368.27

La **Tabla 36** presenta la relación de los costos\_ beneficios (C/B) actual, proyectados bajo efectos de cambio climático y alternativas de adaptación, teniendo en cuenta por un lado solo las unidades de energía eléctrica generada y por otro las unidades de energía eléctrica generada y la mejora en la demanda insatisfecha en la región, así:

$$C/B_{\dagger} = (AOM + CUP * N^{\circ} \text{ de Unidades}) / PUB * N^{\circ} \text{ de Unidades}$$

$$C/B_{\ddagger} = (AOM + CUP * N^{\circ} \text{ de Unidades}) / (PUB * N^{\circ} \text{ de Unidades} + PUCA * N^{\circ} \text{ de Unidades})$$

Donde:

AOM: Costos anuales de administración, operación y manejo (\$)

CUP: Costos unitarios de producción (\$/KWh)

PUB: Precios unitarios en bolsa (\$/KWh)

PUCA: Precios unitarios al consumidor del agua (\$/m<sup>3</sup>)

**Tabla 36.** Análisis costo/beneficio de los efectos del cambio climático y alternativas de adaptación sobre la generación de energía hidroeléctrica.

Escenario/Var.	GWh/año	Demanda Satisfecha (MMC)	C/B <sub>†</sub>	C/B <sub>‡</sub>
Actual_CL	1418.9		0.658	
Promedio Ponderado	1189.1		0.674	
Bombeo	1354.1	4.1	0.662	0.634
Bombeo 1	1285.9	1.6	0.667	0.655
Bombeo 2	1375.6	6.1	0.661	0.621
Bombeo 3	1371.2	2.3	0.661	0.646

†Cálculo teniendo en cuenta solo las unidades de energía eléctrica generada en cada alternativa.

‡Cálculo teniendo en cuenta las unidades de energía eléctrica generada y la mejora en la demanda insatisfecha de agua.

En la columna 3 se observa como bajo los efectos del cambio climático la relación costo\_beneficio podría aumentar (pérdidas) aproximadamente 2.43% con relación a la situación actual, sin embargo al incluir las estrategias de adaptación se encuentra cierta

recuperación, por ejemplo, en la alternativa denominada bombeo 2 el aumento de la relación sería del 0.46% solamente. Incluyendo en el análisis la mejora de la demanda insatisfecha o la ganancia de agua por la aplicación de las alternativas, se encuentra una disminución en la relación C/B en todas las alternativas, por ejemplo, una disminución (ganancia) de 5.6% en la alternativa bombeo 2 con relación al actual (Ver columna 4).

## 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La metodología propuesta en esta investigación integra diferentes herramientas y modelos que permiten incluir de forma robusta los potenciales cambios climáticos, en los análisis de vulnerabilidad de los recursos hídricos y sectores relacionados con los mismos, a nivel de cuencas.

De acuerdo con los resultados obtenidos y comparaciones realizadas con diferentes modelos, se encuentra que los datos de salida del Modelo HadCM3 y el SDSM, logran explicar y proyectar satisfactoriamente las condiciones climáticas de las áreas objeto de estudio.

Aunque en el análisis de incertidumbres aparecen los escenarios HadCM3, con valores extremos, la aplicación de reducción de escala lo ubica como un modelo razonable en el área de estudio; además, es importante tenerlo en cuenta en los aspectos de la gestión ambiental y evaluación de impactos, en la lógica de prevenir, evitar si es posible y si no mitigar los impactos extremos no deseables.

Si bien las tendencias actuales de la precipitación y la temperatura máxima en la Cuenca del Sinú-Caribe muestran una alta variabilidad, se puede observar un aumento de ambas, las cuales concuerdan con el sentido del cambio y los valores relativamente cercanos a los



obtenidos de los escenarios HadCM3 y la aplicación del SDSM y del análisis de incertidumbres mediante las salidas de los modelos del MAGICC-SCENGEN y los experimentos realizados por el CICS para el periodo 2010-2039, como se puede deducir del anexo VII, las tablas 7 y 8 y figuras 21a y 22a.

Los análisis realizados bajo el escenario A2 y B2, evidencian la necesidad de diseñar políticas, estrategias y tomar medidas eficientes y eficaces, desde todos los sectores productivos y económicos, con el propósito de disminuir la producción de gases de efecto invernadero.

Se pudo corroborar que la producción de gases de efecto de invernadero, al ritmo de las características y consideraciones de los escenarios de la familia A2, implicarían un aumento mas rápido y mayor en la temperatura y cambios mas marcados en la precipitación, con relación a los cambios observados en los escenarios B2, cuyas proyecciones de producción de estos gases acordes a sus consideraciones son menores que en el caso A2.

En la Cuenca del Bajo Magdalena se proyectan aumentos en la temperatura máxima y mínima y disminución de precipitación, a medida que transcurre el tiempo, confiriéndole una condición deficitaria más crítica que la actual, en cuanto al recurso hídrico se refiere; además, una gran parte de la Cuenca ya presenta un alto grado de aridez y profundos procesos de desertificación.

Aunque en la Cuenca del Sinú-Caribe se observa un aumento de precipitación para todos los periodos analizados y aparentemente no se observa un gran déficit del recurso hídrico; el aporte de caudal del Río Sinú al embalse, el volumen almacenado en presa y la generación de energía eléctrica tendrían que ser cuidadosamente analizados.

El análisis de sensibilidad y el índice de vulnerabilidad del sistema de generación hidroeléctrico, permitieron determinar que la probabilidad y frecuencia que el sistema sea vulnerable en grado bajo es del 44.4%. En esta probabilidad se encuentran implícitas disminuciones de volumen almacenado en presa en un rango aproximado de 0 a 11%, en aporte de caudal de 0 a 8.5% y de generación de energía de 0 a 10%. La probabilidad de grado medio 22.2%, está relacionada con disminuciones en volumen almacenado, aporte de caudal y generación eléctrica en los rangos de 12 a 16%, 8.5 a 20% y 11 a 22% respectivamente. La probabilidad del sistema de tener un grado alto de vulnerabilidad es de 33.3%, con disminuciones mayores a 16%, 20% y 22% en volumen almacenado, aporte de caudal y generación de energía eléctrica respectivamente.

El IVGHR proporciona información sobre la tendencia y el grado de afectación que el cambio climático pueda tener en la generación de energía hidroeléctrica y, permite hacer el seguimiento de la evolución del sistema mediante el análisis de unas pocas variables de fácil medición, pero altamente explicativas de la vulnerabilidad.

El escenario promedio ponderado ofrece una alternativa que permite generar estrategias de adaptación y mitigación ante los cambios proyectados, dado que incluye las proyecciones de todos los escenarios en la lógica de prevenir los efectos mas adversos, contribuyendo en el manejo y planeación de la generación eléctrica, disminuyendo incertidumbres, evitando contingencias y sobre costos y brindando mayor información, entre otros.

La reducción de generación de energía, conforme transcurre el tiempo, puede influir en mayores costos de generación, los cuales pueden ser trasladados a los consumidores, provocando igualmente un desequilibrio en la relación oferta-demanda que afectaría a los usuarios y todos aquellos sectores que dependen tanto del recurso hídrico, como del energético.

El I.P. para la cuenca del Sinú\_Caribe, pone de manifiesto la necesidad de tomar medidas inmediatas, en cuanto a la planeación y manejo del recurso hídrico, con el propósito de evitar desabastecimientos, contingencias y conflictos entre los usuarios y todos los sectores económicos y productivos relacionados con el recurso.

Se evidencia que el efecto del cambio climático se puede manifestar de forma diferente incluso a nivel regional, por lo que se deben realizar esfuerzos en la búsqueda y elaboración de herramientas que permitan determinar estos efectos a nivel regional y local con un grado mínimo de incertidumbre, y que a su vez posibiliten diseñar medidas, estrategias y mecanismos de mitigación y adaptación.

Es necesario incluir las variaciones climáticas devenidas del calentamiento global, en los estudios y evaluaciones de impacto ambiental, a nivel sectorial y en la planeación, ejecución y proyecciones de los proyectos de desarrollo ya que, como se pudo observar, estas dan indicios claros de la vulnerabilidad y/o potencialidad de los sistemas a futuro, otorgando mayor información a los planeadores y tomadores de decisiones, lo que a su vez puede inducir menores costos de gestión, mejores planes de contingencia, disminución de desastres y en el diseño y puesta en práctica de estrategias y políticas ambientales.

La metodología propuesta y la aplicación del WEAP permiten hacer un análisis integral de los recursos hídricos en la región de estudio, conjuntamente con una alta maniobrabilidad en cuanto a la planeación y manejo sustentable de los recursos, así como en el diseño de estrategias de adaptación y mitigación de los efectos adversos y la potenciación de los aspectos positivos a nivel sectorial, territorial y en su conjunto.

Todos los escenarios climáticos analizados en la cuenca, concuerdan con aumentos en temperatura, aumentos o disminución en precipitación y reducciones en los caudales, por lo que parecen dar indicios claros de los efectos adversos que el calentamiento global puede generar sobre los recursos hídricos a nivel local o regional, haciéndose necesarias, la “regionalización” del calentamiento global y la elaboración de herramientas integradoras, que permitan observar y analizar con más detalle los efectos adversos o no.

La inclusión de las variables climáticas-hidrológicas proyectadas ante un potencial cambio, son de gran importancia ya que es posible incorporarlas en diferentes análisis, estudios y proyecciones ambientales, sectoriales, de manejo y planeación de recursos, ecosistemas y del territorio, como lo muestra este trabajo, pues permiten planear sobre un marco de referencia mucho mas amplio y reducir la incertidumbre en cierta forma.

De lo observado en el Municipio de Montería, se evidencia la necesidad de seguir insistiendo en el mejoramiento de los sistemas de suministro y retorno de los recursos hídricos, desarrollar nuevas tecnologías de surtidores y diferentes accesorios mucho mas eficientes, elaboración de estrategias y políticas para el uso eficiente del agua, tratamiento de aguas servidas e incorporación de las mismas al sistema.

El recurso hídrico como factor limitante en la cuenca del Sinú\_Caribe, pone de manifiesto que las modificaciones en las variables climáticas\_hidrológicas a causa del cambio climático, tendrán efectos adversos significantes, en cuanto a los elementos físicos, bióticos, económicos y socioculturales propios de la región.

De acuerdo con las diferentes proyecciones de las diversas variables que envuelve el análisis de oferta\_demanda del recurso hídrico en la región, se estima que para la época de los 60s del presente siglo, se estaría en un punto crítico en cuanto a la “capacidad de soporte o carga” de la cuenca, pudiéndose potenciar e iniciar graves conflictos sectoriales.

Los escenarios de adaptación analizados muestran que, intervenir las condiciones iniciales o las tasas de cambio de la demanda en cualquier tiempo son de gran beneficio y contrarrestan de alguna forma los efectos adversos del cambio climático, sin embargo, esto solo permitiría ganar algo de tiempo, haciéndose necesario adelantar otros estudios tendientes a la adaptación y mitigación de los impactos, que envuelvan entre otros, la caracterización y respuesta de los diferentes factores físicos y bióticos ante posibles cambios en la región, el ordenamiento territorial, sectorización de la agricultura y ganadería en zonas verdaderamente aptas para dichas actividades.

Acordes con las proyecciones de los diferentes escenarios, las condiciones actuales del grado de aridez y degradación en cuanto a los factores bióticos-físicos de la cuenca, el índice de escasez y presión sobre los recursos hídricos se irán agudizando conforme transcurra el tiempo; en este sentido se hacen necesarios la conservación de bosques, de coberturas vegetales y otros elementos de regulación hídrica, así como la recuperación y reforestación de áreas degradadas de aptitud forestal además de la necesidad de adelantar estudios orientados a reordenar las áreas de producción agropecuaria y evitar la expansión de la misma.

Las estrategias propuestas para la optimización de la generación de energía eléctrica en los meses más críticos, parecen una buena alternativa para mitigar los efectos adversos proyectados por los potenciales cambios climáticos en la región dado que, presentan menos disminución de la generación eléctrica y mayor volumen almacenado en presa respecto al escenario actual y menor demanda insatisfecha respecto al escenario promedio ponderado.

Las estrategias de optimización de generación, indican que es fundamental determinar con un alto grado de precisión las cantidades exactas de caudal a bombear y el inicio del bombeo, de tal forma que mejoren o mantengan la relación oferta\_demanda de los diferentes sectores y/o actividades aguas abajo, en vez de convertirse, por el contrario, en un factor negativo de dicha relación incrementando la demanda insatisfecha, iniciando o potenciando diversos conflictos por el recurso.

Es mucha la información adicional que puede obtenerse mediante la aplicación del WEAP como, costos e ingresos de suministro de energía y agua, costos y beneficios de la aplicación de políticas de uso eficiente del agua y estrategias de adaptación, calidad del agua entre otras, lo cual no era el objetivo de la presente investigación, por no estar al alcance de la misma, por falta de información.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ÁNGEL, et al. 1997. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo: una propuesta desde los proyectos energéticos. Fondo FEN, Santa Fé de Bogotá, 290pp.

ANGEL, E. 2000. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, 152pp.

ARNELL, N., et al. 2001. Hydrology and Water Resources In: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, K. S. White. Cambridge University Press, pp. 192-233.

AXEL, K., et al. 2000 “A Green Planet Versus A Desertworld: Estimating The Maximum Effect of Vegetation on the Land Surface Climate”. In Climatic Change 44: 471-493.

BERNAL, N. 2001. Aplicación del Método de reducción de Escala (Statistical Downscaling) al Modelo climático Global CCM3 en el territorio Colombiano. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 119pp.

CAF (Corporación Andina de Fomento). 2000. El Fenómeno El Niño 1997- 1998 Memoria, Retos y Soluciones Volumen III: COLOMBIA. Caracas, VE. 232pp.

CONDE, C. 2003. Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio y a la Variabilidad Climática. Conceptos y Métodos Básicos.

CONDE, C., et al. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. Climate Research. 9(1):17-23.



CONDE, C., H. EAKIN. 2003. Adaptation to Climatic Variability and Change in Tlaxcala, México. in: Climate Change, Adaptive Capacity and Development., J. Smith, R. Klein, S-Huq. (editors). Imperial College Press , London.

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). 2005. Censo Poblacional 2005. Colombia.

Departamento Nacional de Planeación y Fondo Nacional de Desarrollo. 1991. Determinación de consumos básicos de agua potable en Colombia. Bogotá.

GAY, C. 2000. México: Una Visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Resultados de los Estudios de Vulnerabilidad del País Coordinados por el INE con el Apoyo del U.S. Country Studies Program. SEMARNAP, UNAM, USCSP. 220 pp.

GAY, C., et al. (eds). 1995. Memorias del Primer Taller del Estudio del País: México ante el Cambio Climático. Cuernavaca, Mor. 1994. INE, CCA, UNAM, USCSP. México.

GAY, C., et al. (eds). 1996. Memorias del Segundo Taller del Estudio del País México ante el Cambio Climático. Cuernavaca, Mor. 1995. INE, CCA, UNAM, USCSP. México.

GAY, C., et al. 2007. Some implications of time series analysis for describing climatologic conditions and for forecasting. An illustrative case: Veracruz, México. In *Atmósfera*. Vol. 20 N° 2. 147-170.

GILPIN, A., 1995. Environmental impact assessment: cutting edge for the twenty-first century. Cambridge University Press.

GRANADOS, J. y BUELVAS R. 2007. Información Básica, Identificación de Proyectos, Definición de Necesidades, Justificación y Priorización de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento Básico del Municipio De San Antero. Colombia. 16pp.

GUHL, E. et al. 2000. Vida y Región: Gestión Ambiental en el Valle del Cauca. Santiago de Cali, CVC. P 176.

HULME, et al. 2000. Using Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessment: MAGICC and SCENGEN. Version 2.4 Workbook, Climate Research Unit, Norwich. UK, 52 pp.

IDEAM, 2000. Estudio Nacional del Agua. Colombia. 39pp.

\_\_\_\_\_, 2000. La Atmósfera, el tiempo y el clima. 2000.

\_\_\_\_\_, 2000. Flujo de materiales y energía en la economía Colombiana. 2000.

\_\_\_\_\_, 2001. Colombia: Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

IPCC, 2001. Third Assessment Report “Impacts, Adaptation and Vulnerability”. Climate Change. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO. UNEP. 110pp.

\_\_\_\_\_, 2001. Third Assessment Report. “Mitigation”. Climate Change. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report by the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO. UNEP. 95pp.

\_\_\_\_\_, 2001. Special Report on Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. 27pp.

\_\_\_\_\_, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

\_\_\_\_\_, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

JIMÉNEZ, G. and L.M. SERNA. 2000. Propuesta de un Índice para la Determinación de Especies Vegetales Compatibles con las Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 118pp.

KENNETH, D. FREDERICK. "Climate change impacts on water resources and possible responses in the MINK region" En *Climatic Change*, June 1993 v24 n1-2 p83(33)

LAJONES, D. 2000. Etnobotánica en las comunidades de Arenales y San Salvador, Esmeraldas-Ecuador. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

LANDA, R., MAGAÑA V., NERI C. 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. México. D.F.

LEE, et al. 2005. WEAP. Water Evaluation And Planning System USER GUIDE. Stockholm Environment Institute Tellus Institute 11 Arlington Street Boston, MA 02116-3411 USA. 176pp.

LEVY, et al. 2004. Modelling the impact of future changes in climate, CO<sub>2</sub> concentration and land use on natural ecosystems and the terrestrial carbon sink. In *Global Environmental Change* 14, 21–30

MAGAÑA, V., C. CONDE, O. SÁNCHEZ, GAY, C. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research*. 9(2):107-114.

MELISA, E. LANE; PAUL H. KIRSHEN; RICHARD M. VOGEL. "Indicators of impacts of global climate change on U.S. water resources". En *Journal of Water Resources Planning and Management*, July-August 1999 v125 i4 p 194(1).

MENDOZA, V., VILLANUEVA E., ADEM, J. 1997. "Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change". In *Cimate Research*, Vol. 9: 139-145.

MENDOZA, V., VILLANUEVA E., MADEREY, L., JIMÉNEZ, A. 1995. Vulnerabilidad de los Recursos Hidrológicos ante el Cambio Climático. México.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2005. Mitigación del cambio climático.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004. Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia. Bogotá. pp 124.

MITCHELL, JFB. 2004. Environmental prediction, Science and technology in the Met Office. pp 38.

NANCY SHUTE; THOMAS HAYDEN; CHARLES W. PETIT; RACHEL K. SOBEL; KEVIN WHITELAW; DAVID WHITMAN. "The Weather Turns Wild". En U.S. News & World Report, Feb 5, 2001 v130 i5 p 44.

OECD, "OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews", Environmental Monograph # 83, 1993, Paris.

\_\_\_\_\_. Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OECD), 1979.

OMM (Organización Meteorológica Mundial).2004. Trabajando juntos para reducir el riesgo de desastres hidrometeorológicos. Boletín Tiempo-Clima-Agua. 53(1):15-18.

OROPEZA, O., HERNÁNDEZ, M., ZÁRATE, R., ORTEGA, J., ALFARO, G., ANAYA, M., PASCUAL, M. 1995. Vulnerabilidad a la Desertificación y a la Sequía Meteorológica. México.

OSPINA, J.E. and A. LEMA. 2004. Indicadores Cuantitativos de los Impactos Generados en Proyectos de Desarrollo Lineales. En Revista Gestión y Ambiente. Vol. 7-Nº I.

OSPINA, J.E. 2004. Propuesta de Indicadores Cuantitativos de los Impactos por su Grado de Incidencia Identificados por un Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones, en Proyectos de Transmisión Eléctrica de ISA. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 186pp.

\_\_\_\_\_, 2005. Tratamiento Estadístico para Indicadores Cuantitativos de Impactos, Aplicados a Líneas de Transmisión eléctrica. En Revista Facultad Nacional de Agronomía. Vol. 58. N° 2.

POSADA, L. “La problemática ambiental y los diversos enfoques de la teoría económica”. Revista Ensayos de Economía, Facultad de Ciencias Humanas y Económicas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Vol. 7. Dic 1997. Pp 32-52.

RAU, JG., and DC. WOOTEN. 1980. Environmental Impact Analysis. Handbook. New York: McGraw-Hill, p. 37.

SAJJAD, M., et al. 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. In Journal of Hydrology 319, 357–382.

THERIVEL, R., et al. 1992 Strategic environmental assessment. Earthscan. London.

TRENBERTH, KE., et al. 2003. The changing character of precipitation. Bull. Am. Meteorol. Soc., 84(9):1205-1217.

TURNPENNY, J. 2002. Power, Politics and Science: Development of the UKCIPO2 Climate Change Scenarios for the UK. Presentación en el curso AIACC course on Development and Applications of Scenarios in Impacts, Adaptation and Vulnerability Assessments. Norwich, UK, abril 15 – 26.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2006. Application of environmentally sound technologies for adaptation to climate change. Technical paper FCCC/TP/2006/2 10 May 2006. 107pp.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2005. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. 155pp.

UPME. 2005. Boletín Estadístico de Minas y Energía 1999-2005, Colombia., 132 pp.

\_\_\_\_\_, 2005. Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2006-2020. Ministerio de Minas y Energía. 200 pp.

\_\_\_\_\_, 2006. Plan Energético Nacional Contexto y Estrategias 2006-2025. 240 pp.

WATHERN, P. 1994. An introductory guide to EIA. en Environmental Impact Assessment: theory and practice. Routledge., 3-30.

WATSON, R., et al. 1998. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for policymakers. Report of IPCC Working group II. 16pp.

WIGLEY, T.M.L. 1994. MAGICC (Model for Assessment of Greenhouse –gas Induced Climate Change): User’s Guide and Scientific Research Manual. National Center for Atmospheric Research, Boulde.

\_\_\_\_\_, 2003. MAGICC/SCENGEN: User-friendly software for GCM inter-comparisons, climate scenario development and uncertainty assessment. Tom M.L. Wigley, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307.

WIGLEY., et al. 2000. The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator Version 2.4: Technical Manual.

WILBY R. and C. DAWSON. 2007. SDSM 4.1 — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. 93pp.

<http://climate.geog.udel.edu/~wimp/>.

<http://www.cco.gov.co>

<http://kyousei.aesto.or.jp/~k041open/data/>

<http://www.dane.gov.co/>

[WWW.ine.gob.mx/ucci/cam-clima/mycc.htm](http://www.ine.gob.mx/ucci/cam-clima/mycc.htm)

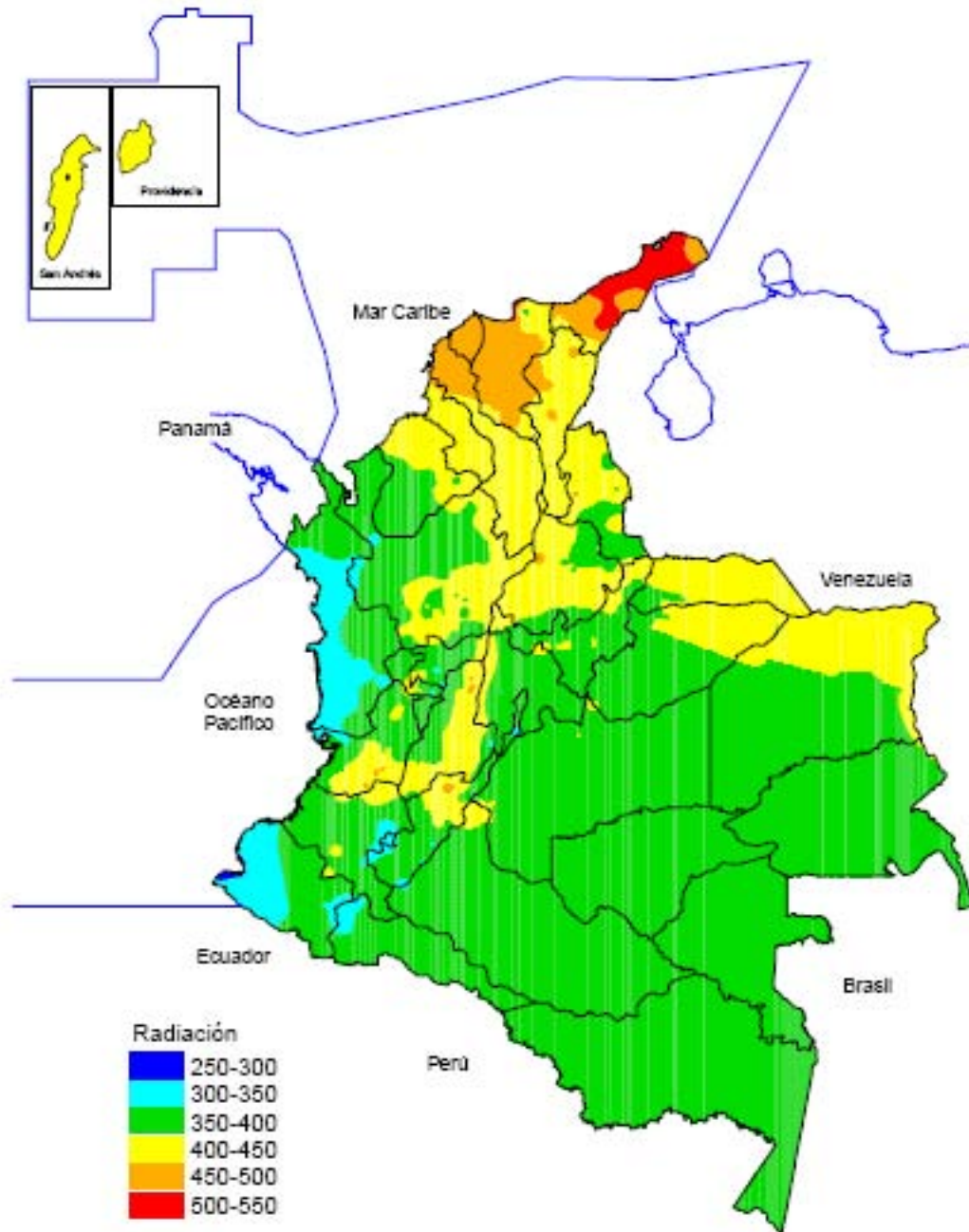
[WWW.ine.gob.mx/ucci/cam-clima/mycc.htm](http://www.ine.gob.mx/ucci/cam-clima/mycc.htm)

<http://www.cco.gov.co>

ANEXO I

MAPA IA

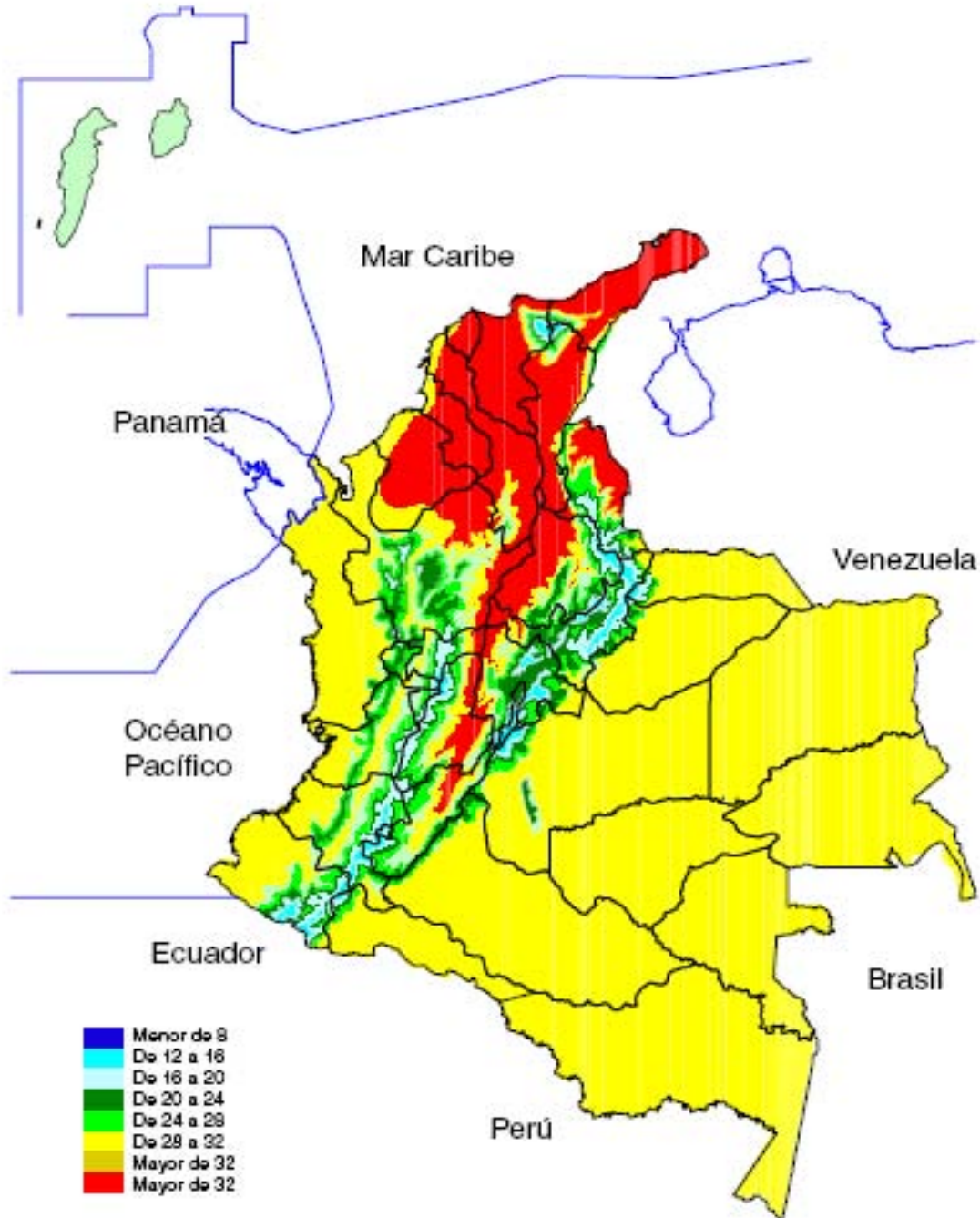
Radiación solar anual (cal/cm<sup>2</sup>/min)



Fuente: Ideam, 2000

## MAPA IB

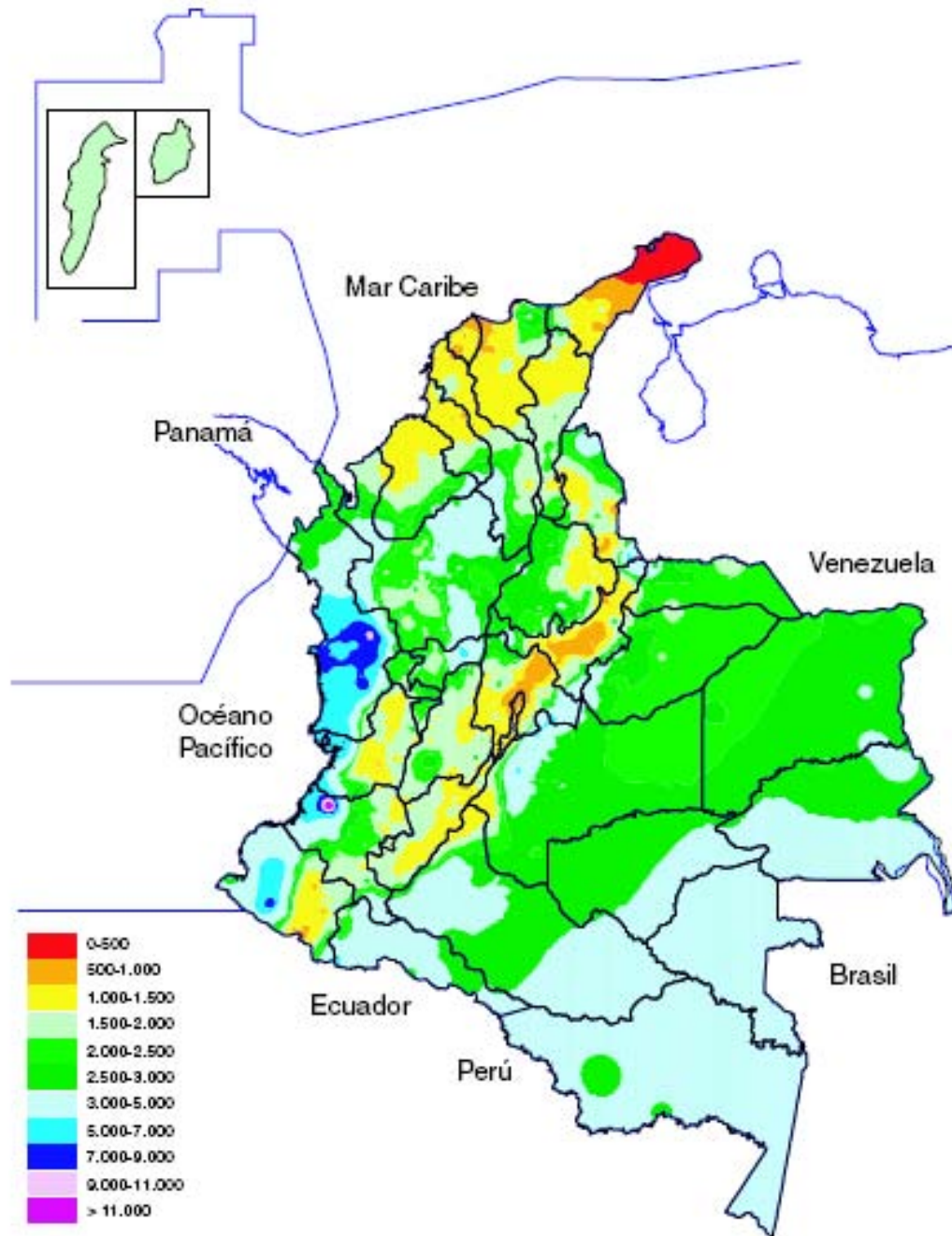
Distribución de la temperatura máxima anual en Colombia en grados centígrados.



Fuente: Ideam, 2000

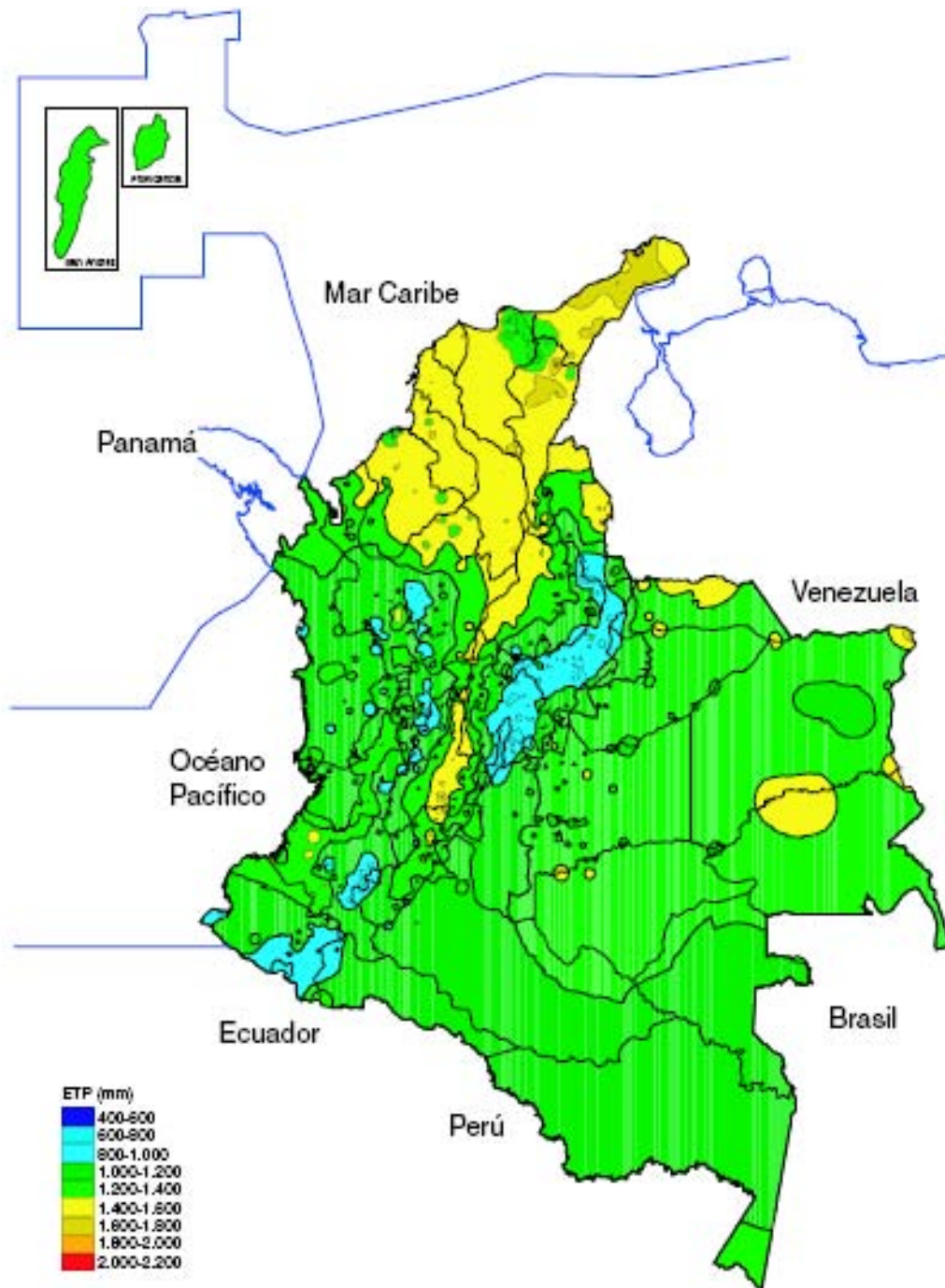


MAPA IC  
Distribución de la precipitación media anual (mm) en Colombia.



Fuente: Ideam, 2000

MAPA ID  
Distribución de la evapotranspiración potencial media anual (mm)

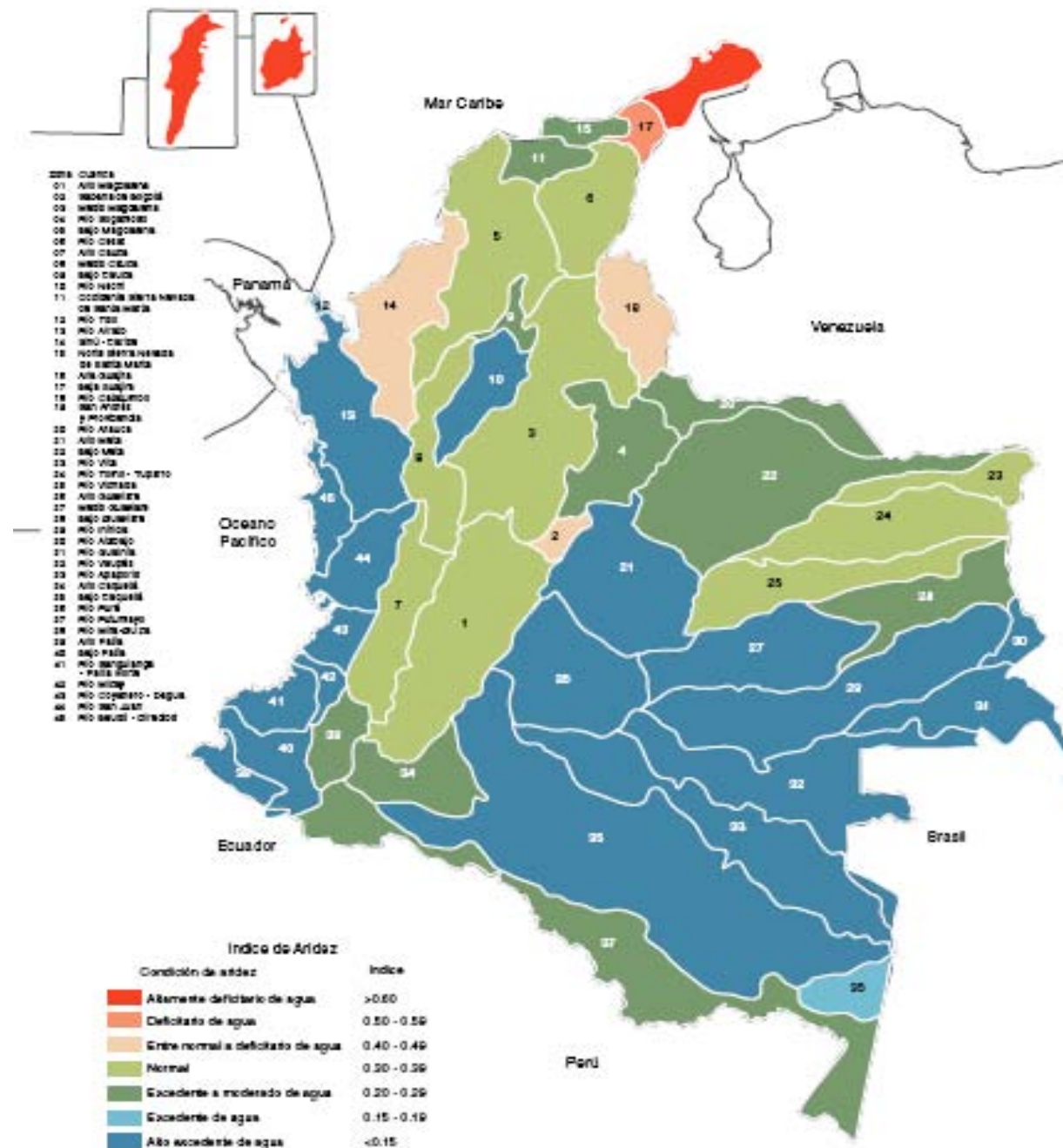


Fuente: Ideam, 2000

ANEXO II

MAPA IIA

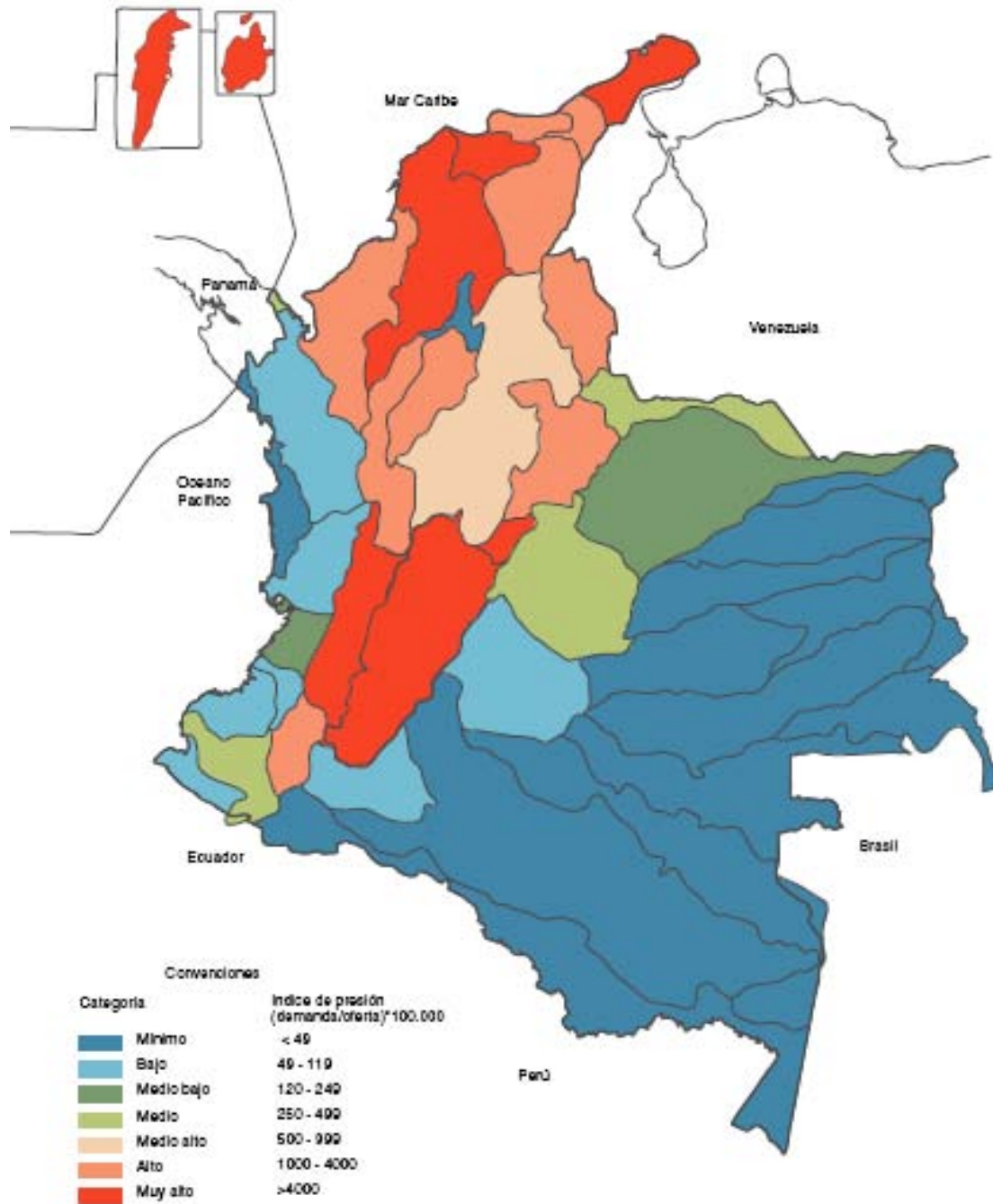
Excedentes y déficit del agua en cuencas de referencia (índice de aridez).



Fuente: Ideam, 2000

## MAPA IIB

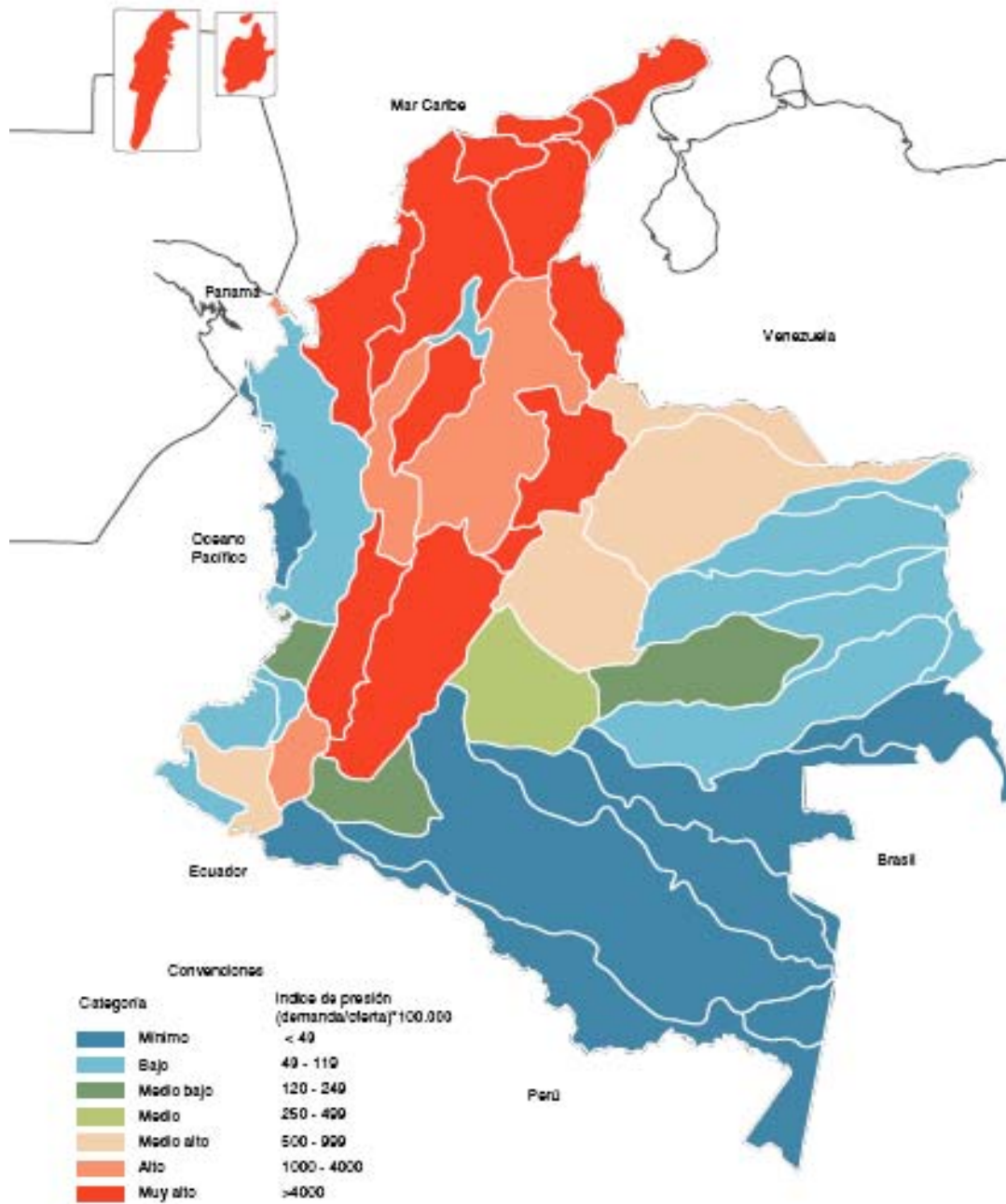
Índice de presión como indicativo de la relación demanda/oferta. Condiciones hidrológicas de año medio.



Fuente: Ideam, 2000

MAPA IIC

Índice de presión como indicativo de la relación demanda/oferta. Mes típico seco para condiciones hidrológicas de año seco.



Fuente: Ideam, 2000

## Anexo III

*Índices con relación a la oferta\_demanda de los recursos hídricos.*

Índice	Rangos	Cualificación	Criterio
Índice de Presión (IP) Resulta de multiplicar el cociente de la demanda total sobre la oferta natural del recurso hídrico de la cuenca por 100000.	< 40	Mínimo	
	40-119	Bajo	
	120-249	Medianamente bajo	
	250-449	Medio	
	500-999	Medio alto*	
	1000-4000	Alto**	
> 4000	Muy alto		
Índice de aridez (Ia) Ia= (ETP-ETR)/ETP, donde: ETP: Evapotranspiración potencial (mm) ETR: Evapotranspiración real (mm)	>0.60	Altamente deficitaria	
	0.50-0.59	Deficitarias	
	0.40-0.49	Normales a deficitarias*	
	0.30-0.39	Normales**	
	< 0.15	Excedentes	
Índice de Escasez (IE) Relación porcentual de la demanda respecto a la oferta	< 1%	No significativo	Demanda no significativa con relación a la oferta
	1-10%	Mínimo*, **	Demanda muy baja respecto a la oferta
	11-20%	Medio	Demanda baja respecto a la oferta
	21-50%	Medio alto	Demanda apreciable
	> 50%	Alto	Demanda alto respecto a la oferta

\*Estado de la Cuenca Sinú-Caribe al 2001, según el Ideam.

\*\*Estado de la Cuenca del Bajo Magdalena al 2001, según el Ideam.

**ANEXO IV****Aspectos Técnicos, Operativos y Batimetría de la Represa Urrá 1.****TURBINAS**

Potencia	85.000 KW
Tipo de Turbina	Francis
Velocidad de Rotación	120 r.p.m.
Velocidad de empalamiento	210 r.p.m.
Caída neta máxima	56.44 metros
Caída neta de diseño	54.41 metros
Caída neta mínima	33.62 metros
Caudal a potencia nominal	175 m <sup>3</sup> /s
Díámetro de rodete	4700 mm.

Los generadores de la Central URRÁ I son de eje vertical, de tipo sombrilla y constan de las siguientes características:

Potencia nominal	92.7 MVA.
Número de fases	3
Frecuencia nominal	60 HZ.
Factor de potencia	0.9
Velocidad nominal de rotación	120 r.p.m.
Velocidad de empalamiento	210 r.p.m.
Peso total	740 ton.

Los transformadores de unidad y el autotransformador tienen las siguientes características:

Transformador de unidad	
Cantidad	5
Capacidad nominal	105 MVA.
Número de fases	3
Voltaje primario	13.8 KV
Voltaje secundario	241.5 KV
Grupo de conexión	Dy01
Tipo de enfriamiento	ONAF
Peso total	150 ton.

## AUTOTRANSFORMADOR

Cantidad	1
Capacidad nominal	90 MVA
Número de fases	3
Voltaje primario	230 KV

## PRESA Y DIQUE AUXILIAR

Tipo	Núcleo	impermeable de gravas Arcillosas y espaldón de gravas limpias con protección de enrocado.
Altura del Dique	Auxiliar	51 m

## EMBALSE

Ancho máximo	20 km
Volumen muerto	528 millones de m <sup>3</sup> de agua
Volumen total	1.740 millones m <sup>3</sup>
Cota de rebose del embalse	128.50 msnm
Cota mínima de operación	107 msnm
Profundidad máxima	65.50 m
Perímetro	245 km
Cuenca aportante	4.600 km <sup>2</sup>
Vida útil	50 años.

## BATIMETRÍA

Nivel	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Nivel	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Nivel	Volumen (Mm <sup>3</sup> )
75.0	0.00	94.0	74.99	113.0	639.14
76.0	0.00	95.0	91.01	114.0	685.47
77.0	0.00	96.0	108.45	115.0	734.16
78.0	0.01	97.0	127.51	116.0	785.67
79.0	0.03	98.0	148.07	117.0	840.34
80.0	0.07	99.0	170.05	118.0	898.31
81.0	0.16	100.0	193.47	119.0	959.79
82.0	0.32	101.0	218.34	120.0	1024.79
83.0	0.59	102.0	244.71	121.0	1093.49
84.0	1.02	103.0	272.59	122.0	1165.98
85.0	1.98	104.0	301.99	123.0	1241.59
86.0	3.79	105.0	332.98	124.0	1320.03
87.0	6.80	106.0	365.64	125.0	1400.49
88.0	11.44	107.0	399.88	126.0	1428.82
89.0	17.59	108.0	435.61	127.0	1565.89
90.0	25.31	109.0	472.93	128.0	1650.69
91.0	35.21	110.0	511.93	128.5	1693.15
92.0	47.01	111.0	552.59		
93.0	60.31	112.0	594.95		



## ANEXO V

## Escenarios de Desarrollo Socioeconómicos (SRES; IPCC, 2001)

<b>Escenario</b>	<b>Descripción</b>
A1	Rápido crecimiento económico, el crecimiento poblacional alcanza su máximo para mediados del siglo XXI, los mecanismos de mercado dominan la economía. Subdivisiones: <b>A1FI</b> : dependencia en combustibles fósiles; <b>A1T</b> : dependencia en combustibles no-fósiles; <b>A1B</b> : dependencia balanceada de fuentes de energía.
A2	No dependencia económica regional, conservación de identidades locales, aumento continuo en la población, crecimiento económico a nivel regional
B1	Uso de tecnologías limpias y eficientes, reducción de consumo material, soluciones globales a problemas económicos y medioambientales, mejor distribución de la riqueza, el crecimiento poblacional alcanza su máximo para mediados del siglo XXI
B2	Soluciones locales a problemas económicos y medioambientales; crecimiento poblacional menor que A2; menor cambio tecnológico que en B1 y A1.

Fuente: Turnpenny, et al, 2002

## ANEXO VI

## Análisis Estadísticos

## A. Pruebas estadísticas (T, F, Wilcoxon y K-S) para estaciones

<i>Estación</i>	<i>Prueba T</i>		<i>Prueba F</i>		<i>Wilcoxon</i>		<i>Kolmogorov-Smirnov</i>	
	T	P-Value	F	P-Value	W	P-Value	K-S	P-Value
2906503	-0.687	0.499	0.699	0.563	83.0	0.544	0.816	0.532
2904511	-0.527	0.603	0.522	0.297	84.0	0.507	0.816	0.532
2903511	-0.876	0.391	0.358	0.103	85.5	0.453	0.816	0.532
Prom.Est.	0.744	0.465	1.85	0.322	57.0	0.402	0.816	0.532
1307502	-0.419	0.679	0.502	0.269	79.0	0.707	0.816	0.532
2502524	-0.679	0.504	0.542	0.325	77.0	0.795	0.816	0.532
Prom.Est.	-0.647	0.525	0.668	0.514	80.0	0.665	0.612	0.847

## B. Análisis de Varianza para el AC

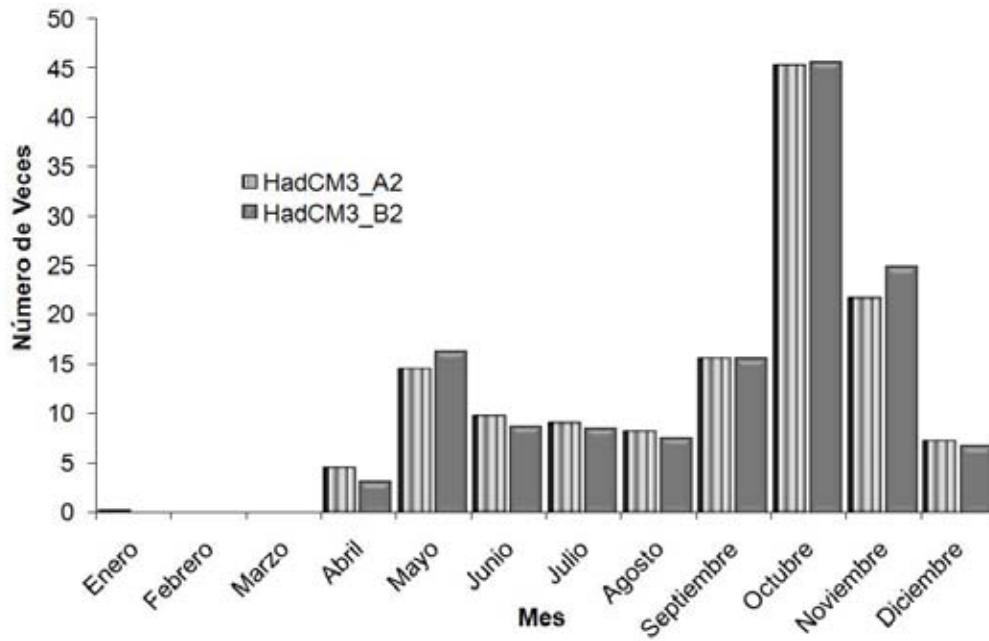
<i>Fuente de Variación</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>F</i>	<i>Nivel de probabilidad</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Modelo	195362.0	2	97681.0	35.2	0.0001	88.7%
Residuales	24974.0	9	2774.9			
Total	220336.0	11				

## C. Pruebas estadísticas (T, F, Wilcoxon y K-S) para AC

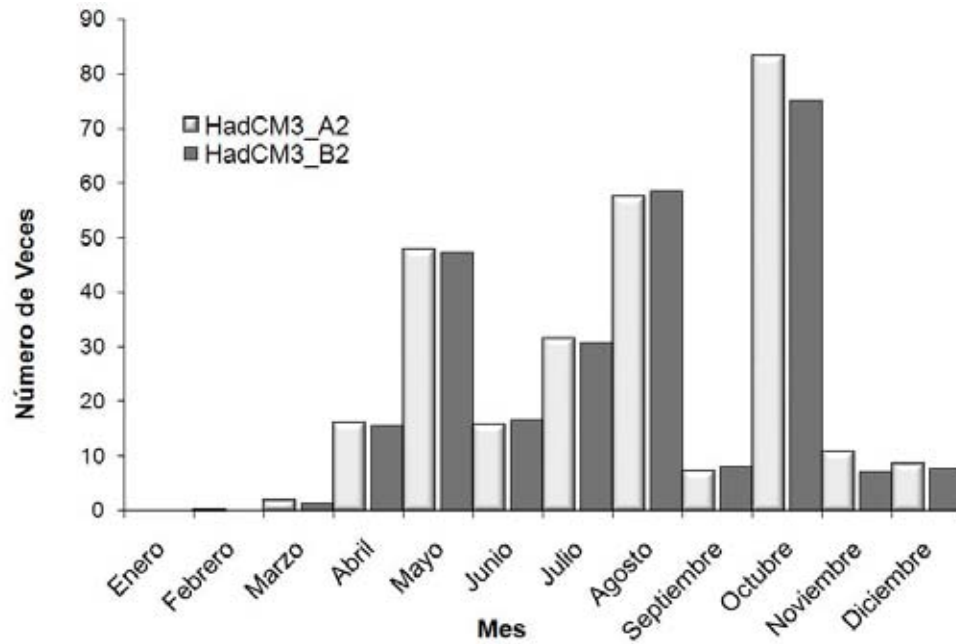
<i>Modelo</i>	<i>Prueba T</i>		<i>Prueba F</i>		<i>Wilcoxon</i>		<i>Kolmogorov-Smirnov</i>	
	T	P-Value	F	P-Value	W	P-Value	K-S	P-Value
AC	0.027	0.979	1.162	0.808	68.0	0.839	0.612	0.847

ANEXO VII

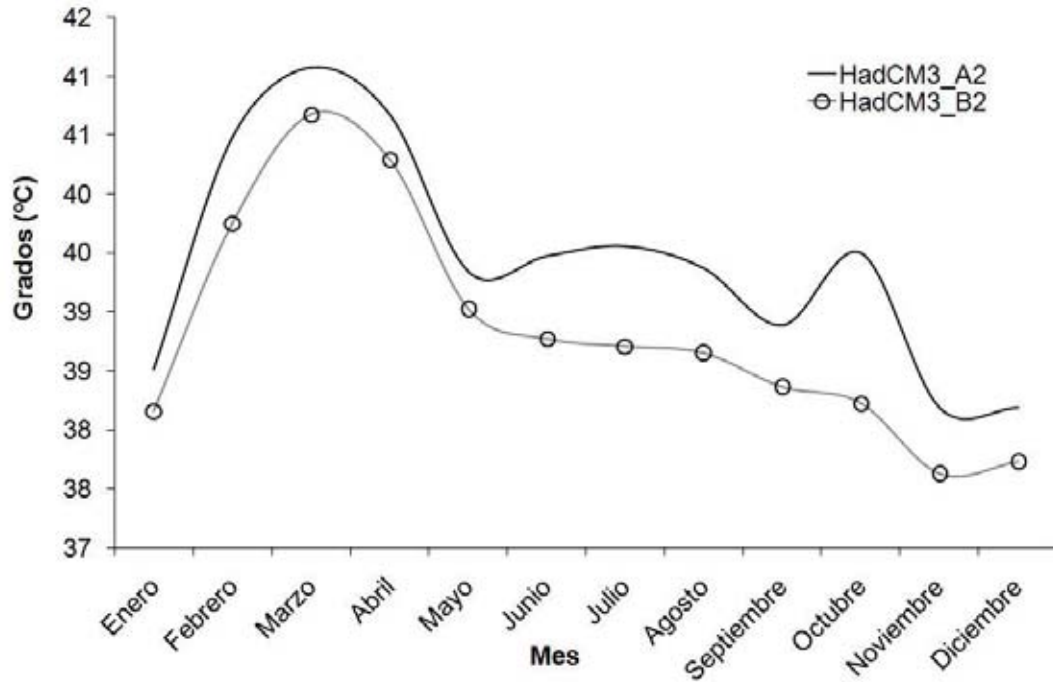
Ilustración de proyecciones climáticas entre escenarios



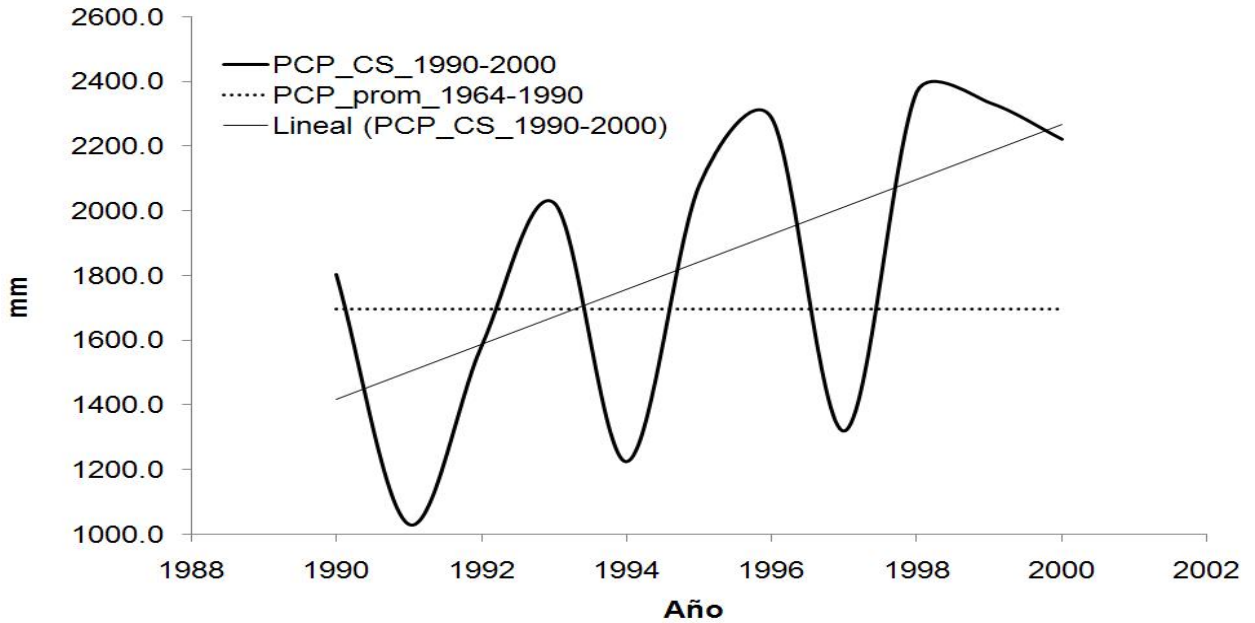
Veces que se rebasa umbral de 40 mm en la Cuenca del Bajo Magdalena, periodo 2070-2099.



Veces que se rebasa umbral de 50 mm en la Cuenca del Sinú\_Caribe, periodo 2070-2099.

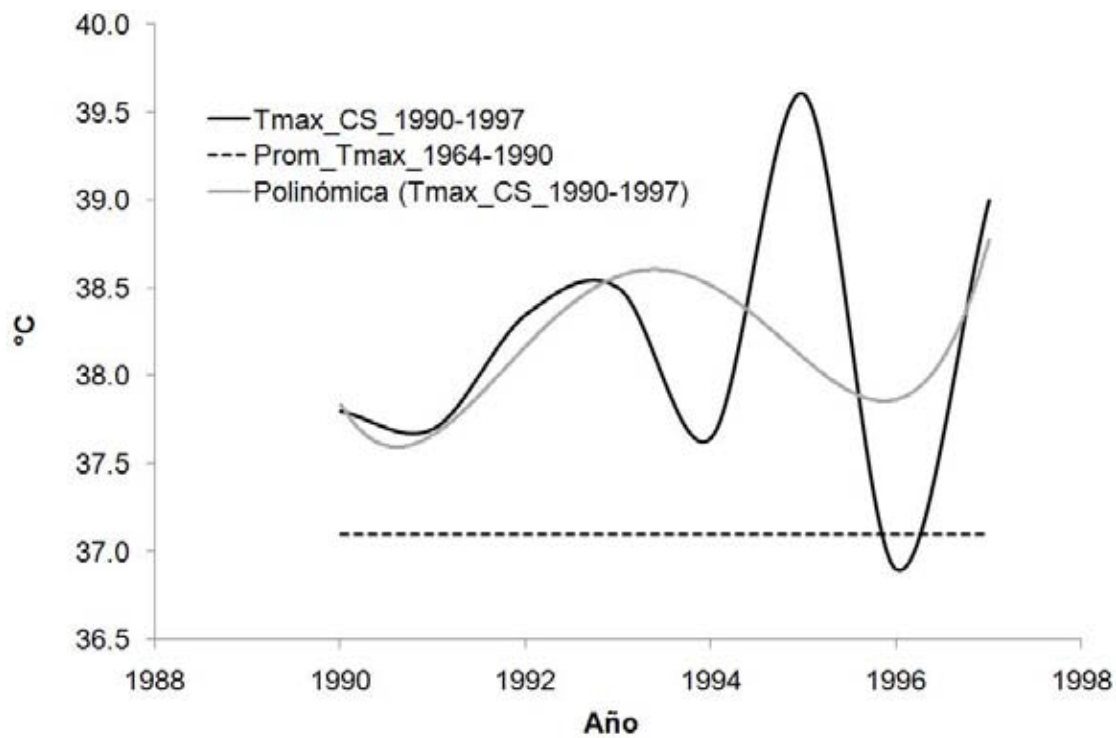


Temperatura Máxima proyectada 2070-2099, Cuenca del Sinú\_Caribe



Tendencia actual de precipitación en la Cuenca del Sinú-Caribe.

Nota: la diferencia entre el promedio histórica (línea base) de la precipitación (1964-1990) y el promedio actual (1990-2000) es de un aumento del 8.6%



Tendencia actual de la temperatura máxima en la Cuenca del Sinú-Caribe.

Nota: la diferencia entre el promedio histórico (línea base) de la temperatura máxima (1964-1990) y el promedio actual (1990-1997) es de un aumento del 1.1°C

## ANEXO VIII

Proyecciones RO, SE y DI al 2100.

Año/Variable	RO	SE	RO_Adap	SE_Adap	%DI	%DI_Adap	SE_CC	SE_Adap_CC	%DI_CC	%DI_Adap_CC
2009	188.7	179.0	151.0	143.2	5.1	5.2	179.0	143.2	5.1	5.2
2010	196.4	183.3	157.2	147.5	6.7	6.1	183.3	147.5	6.7	6.1
2011	204.4	188.2	163.6	152.4	7.9	6.8	188.2	152.4	7.9	6.8
2012	212.8	193.7	170.3	157.9	9.0	7.3	193.7	157.9	9.0	7.3
2013	221.4	199.7	177.2	163.9	9.8	7.5	199.7	163.9	9.8	7.5
2014	230.5	206.3	184.4	170.5	10.5	7.5	206.3	170.5	10.5	7.5
2015	239.9	213.5	192.0	177.7	11.0	7.4	213.5	177.7	11.0	7.4
2016	249.7	221.3	199.8	185.5	11.4	7.2	221.3	185.5	11.4	7.2
2017	259.9	229.6	207.9	193.8	11.6	6.8	229.6	193.8	11.6	6.8
2018	270.5	238.5	216.4	202.7	11.8	6.3	238.5	202.7	11.8	6.3
2019	281.5	248.0	225.3	212.2	11.9	5.8	248.0	212.2	11.9	5.8
2020	293.0	258.1	234.5	222.3	11.9	5.2	258.1	222.3	11.9	5.2
2021	305.0	268.8	244.0	233.0	11.9	4.5	268.8	233.0	11.9	4.5
2022	317.4	280.0	254.0	244.2	11.8	3.9	280.0	244.2	11.8	3.9
2023	330.4	291.8	264.4	256.0	11.7	3.2	291.8	256.0	11.7	3.2
2024	343.8	304.2	275.1	268.4	11.5	2.5	304.2	268.4	11.5	2.5
2025	357.9	317.1	286.4	281.3	11.4	1.8	317.1	281.3	11.4	1.8
2026	372.5	330.6	298.1	294.8	11.2	1.1	330.6	294.8	11.2	1.1
2027	387.7	344.7	310.2	308.9	11.1	0.4	344.7	308.9	11.1	0.4
2028	403.5	359.4	322.9	323.6	10.9	-0.2	359.4	323.6	10.9	-0.2
2029	420.0	374.7	336.1	338.9	10.8	-0.8	374.7	338.9	10.8	-0.8
2030	437.1	390.5	349.8	354.7	10.7	-1.4	390.5	354.7	10.7	-1.4
2031	454.9	406.9	364.0	371.1	10.6	-1.9	406.9	371.1	10.6	-1.9
2032	473.5	423.9	378.9	388.1	10.5	-2.4	423.9	388.1	10.5	-2.4
2033	492.8	441.5	394.4	405.7	10.4	-2.9	441.5	405.7	10.4	-2.9
2034	512.9	459.6	410.5	423.8	10.4	-3.2	459.6	423.8	10.4	-3.2
2035	533.9	478.3	427.2	442.5	10.4	-3.6	478.3	442.5	10.4	-3.6
2036	555.7	497.6	444.6	461.8	10.4	-3.9	497.6	461.8	10.4	-3.9
2037	578.3	517.5	462.8	481.7	10.5	-4.1	517.5	481.7	10.5	-4.1

2038	601.9	537.9	481.7	502.1	10.6	-4.2	537.9	502.1	10.6	-4.2
2039	626.5	558.9	501.3	523.1	10.8	-4.3	558.9	523.1	10.8	-4.3
2040	652.1	580.5	521.8	544.7	11.0	-4.4	580.5	544.7	11.0	-4.4
2041	678.7	602.7	543.1	566.9	11.2	-4.4	602.7	566.9	11.2	-4.4
2042	706.4	625.4	565.3	589.6	11.5	-4.3	625.4	589.6	11.5	-4.3
2043	735.2	648.7	588.3	612.9	11.8	-4.2	648.7	612.9	11.8	-4.2
2044	765.2	672.6	612.3	636.8	12.1	-4.0	672.6	636.8	12.1	-4.0
2045	796.4	697.1	637.3	661.3	12.5	-3.8	697.1	661.3	12.5	-3.8
2046	828.9	722.2	663.3	686.4	12.9	-3.5	722.2	686.4	12.9	-3.5
2047	862.8	747.8	690.4	712.0	13.3	-3.1	747.8	712.0	13.3	-3.1
2048	898.0	774.0	718.6	738.2	13.8	-2.7	774.0	738.2	13.8	-2.7
2049	934.6	800.8	747.9	765.0	14.3	-2.3	800.8	765.0	14.3	-2.3
2050	972.8	828.1	778.4	792.3	14.9	-1.8	828.1	792.3	14.9	-1.8
2051	1012.5	856.0	810.2	820.2	15.5	-1.2	856.0	820.2	15.5	-1.2
2052	1053.8	884.5	843.3	848.7	16.1	-0.6	884.5	848.7	16.1	-0.6
2053	1096.8	913.6	877.7	877.8	16.7	0.0	913.6	877.8	16.7	0.0
2054	1141.6	943.3	913.5	907.5	17.4	0.7	943.3	907.5	17.4	0.7
2055	1188.2	973.5	950.8	937.7	18.1	1.4	973.5	937.7	18.1	1.4
2056	1236.6	1004.3	989.6	968.5	18.8	2.1	1004.3	968.5	18.8	2.1
2057	1287.1	1035.7	1030.0	999.9	19.5	2.9	1035.7	999.9	19.5	2.9
2058	1339.6	1067.7	1072.0	1031.9	20.3	3.7	1067.7	1031.9	20.3	3.7
2059	1394.3	1100.2	1115.7	1064.4	21.1	4.6	1100.2	1064.4	21.1	4.6
2060	1451.2	1133.3	1161.3	1097.5	21.9	5.5	1133.3	1097.5	21.9	5.5
2061	1510.4	1167.0	1208.7	1131.2	22.7	6.4	1167.0	1131.2	22.7	6.4
2062	1572.1	1201.3	1258.0	1165.5	23.6	7.4	1201.3	1165.5	23.6	7.4
2063	1636.2	1236.1	1309.3	1200.3	24.5	8.3	1236.1	1200.3	24.5	8.3
2064	1703.0	1271.5	1362.8	1235.7	25.3	9.3	1271.5	1235.7	25.3	9.3
2065	1772.5	1307.5	1418.4	1271.7	26.2	10.3	1307.5	1271.7	26.2	10.3
2066	1844.9	1344.1	1476.3	1308.3	27.1	11.4	1344.1	1308.3	27.1	11.4
2067	1920.1	1381.2	1536.5	1345.4	28.1	12.4	1350.7	1345.4	29.7	12.4
2068	1998.5	1418.9	1599.2	1383.1	29.0	13.5	1350.7	1350.7	32.4	15.5
2069	2080.1	1457.2	1664.5	1421.4	29.9	14.6	1350.7	1350.7	35.1	18.9
2070	2165.0	1496.1	1732.4	1460.3	30.9	15.7	1350.7	1350.7	37.6	22.0
2071	2253.3	1535.6	1803.1	1499.8	31.9	16.8	1350.7	1350.7	40.1	25.1
2072	2345.3	1575.6	1876.7	1539.8	32.8	18.0	1350.7	1350.7	42.4	28.0
2073	2441.0	1616.2	1953.3	1580.4	33.8	19.1	1350.7	1350.7	44.7	30.9

---

2074	2540.6	1657.4	2033.0	1621.6	34.8	20.2	1350.7	1350.7	46.8	33.6
2075	2644.3	1664.2	2116.0	1663.3	37.1	21.4	1350.7	1350.7	48.9	36.2
2076	2752.2	1664.2	2202.3	1664.2	39.5	24.4	1350.7	1350.7	50.9	38.7
2077	2864.5	1664.2	2292.2	1664.2	41.9	27.4	1350.7	1350.7	52.8	41.1
2078	2981.4	1664.2	2385.8	1664.2	44.2	30.2	1350.7	1350.7	54.7	43.4
2079	3103.1	1664.2	2483.1	1664.2	46.4	33.0	1350.7	1350.7	56.5	45.6
2080	3229.7	1664.2	2584.5	1664.2	48.5	35.6	1350.7	1350.7	58.2	47.7
2081	3361.6	1664.2	2690.0	1664.2	50.5	38.1	1350.7	1350.7	59.8	49.8
2082	3498.7	1664.2	2799.7	1664.2	52.4	40.6	1350.7	1350.7	61.4	51.8
2083	3641.5	1664.2	2914.0	1664.2	54.3	42.9	1350.7	1350.7	62.9	53.6
2084	3790.1	1664.2	3032.9	1664.2	56.1	45.1	1350.7	1350.7	64.4	55.5
2085	3944.8	1664.2	3156.7	1664.2	57.8	47.3	1350.7	1350.7	65.8	57.2
2086	4105.8	1664.2	3285.5	1664.2	59.5	49.3	1350.7	1350.7	67.1	58.9
2087	4273.4	1664.2	3419.6	1664.2	61.1	51.3	1350.7	1350.7	68.4	60.5
2088	4447.8	1664.2	3559.2	1664.2	62.6	53.2	1350.7	1350.7	69.6	62.1
2089	4629.3	1664.2	3704.4	1664.2	64.1	55.1	1350.7	1350.7	70.8	63.5
2090	4818.2	1664.2	3855.6	1664.2	65.5	56.8	1350.7	1350.7	72.0	65.0
2091	5014.8	1664.2	4012.9	1664.2	66.8	58.5	1350.7	1350.7	73.1	66.3
2092	5219.5	1664.2	4176.7	1664.2	68.1	60.2	1350.7	1350.7	74.1	67.7
2093	5432.5	1664.2	4347.2	1664.2	69.4	61.7	1350.7	1350.7	75.1	68.9
2094	5654.2	1664.2	4524.6	1664.2	70.6	63.2	1350.7	1350.7	76.1	70.1
2095	5885.0	1664.2	4709.2	1664.2	71.7	64.7	1350.7	1350.7	77.0	71.3
2096	6125.1	1664.2	4901.4	1664.2	72.8	66.0	1350.7	1350.7	77.9	72.4
2097	6375.1	1664.2	5101.4	1664.2	73.9	67.4	1350.7	1350.7	78.8	73.5
2098	6635.3	1664.2	5309.6	1664.2	74.9	68.7	1350.7	1350.7	79.6	74.6
2099	6906.1	1664.2	5526.3	1664.2	75.9	69.9	1350.7	1350.7	80.4	75.6
2100	7187.9	1664.2	5751.9	1664.2	76.8	71.1	1350.7	1350.7	81.2	76.5

---



**ANEXO IX**

Productos generados.

***Artículos Científicos.***

“Vulnerability of Water Resources in the Face of Potential Climate Change: Generation of Hydroelectric Power in Colombia”. 2009. J.E. OSPINA NOREÑA, C. GAY GARCÍA, A.C. CONDE, V.O. MAGAÑA, G. SANCHEZ TORRES ESQUEDA. Aceptado en revista *Atmósfera*.

“A Proposal for a Vulnerability Index for Hydroelectricity Generation in the Face of Potential Climate Change in Colombia”. 2009. J.E. OSPINA NOREÑA, C. GAY GARCÍA, A.C. CONDE, G. SANCHEZ TORRES ESQUEDA. En evaluación revista *Atmósfera*.

“Analysis of the Water Supply-Demand Relationship in the Sinú-Caribe Basin, Colombia, Under Different Climate Change Scenarios”. 2009. J.E. OSPINA NOREÑA, C. GAY GARCÍA, A.C. CONDE, G. SANCHEZ TORRES ESQUEDA. En evaluación revista *Atmósfera*.

“Recurso Hídrico como Factor Limitante y Optimización de la Generación Hidroeléctrica como Estrategia de Adaptación ante el Cambio Climático en la Cuenca del Sinú\_Caribe”. 2009. J.E. OSPINA NOREÑA, C. GAY GARCÍA, A.C. CONDE, G. SANCHEZ TORRES ESQUEDA. En proceso.

***Memorias en Congresos.***

-Resumen en extenso “Cambio Climático: Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos y de los Sistemas de Generación-Transmisión de Energía Hidroeléctrica en Colombia”. Organización Mexicana de Meteorólogos, AC. Memoria del Congreso 20071116-01 XVI Congreso Mexicano de Meteorología, Ed internacional, 12 al 16 de nov/2007, Veracruz, México.

-Resumen en extenso “Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos Ante un Potencial Cambio Climático y su Relación con la Generación-Transmisión de Energía Hidroeléctrica en Colombia”. Memorias del III Congreso Internacional de Riego y Drenaje “CUBARIEGO-2007”, Mayo 22-24, Cuba.

***Reconocimientos.***

-Reconocimiento al mejor trabajo en el panel posters, por la presentación “Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante un potencial cambio climático y su relación con la generación de energía hidroeléctrica en Colombia”, presentado en el III congreso Internacional de Riego y Drenaje. CUBARIEGO-2007.

-Beca otorgada por la Secretaria de Relaciones Exteriores (SRE), para adelantar los estudios de Doctorado en Física de la Atmósfera del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

-Beca del Programa de Fomento a la Graduación de los Alumnos de Posgrado de la UNAM. Coordinación de Estudios de Posgrado.