



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CUERPO ACADEMICO DE GESTION INTEGRAL DEL AGUA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GESTIÓN DE
SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

TESIS APOYADA POR EL CONSEJO ESTATAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MICHOACAN



PRESENTA

JOEL HERNÁNDEZ BEDOLLA

DIRIGIDA POR

SONIA TATIANA SANCHEZ QUISPE

Morelia Michoacán, Noviembre de 2011



Dedicatoria:

A Dios darme la vida y por permitirme cumplir con un objetivo más en mi vida y por la sabiduría que me ha dado.

A mis padres Raymundo Hernández Gutiérrez y Lucia Bedolla Melgarejo que me dieron la vida y me han apoyado en todo lo que he necesitado, además me han dado la fuerza para seguir adelante, siempre están en mi corazón y en mi mente.

A mis hermanos Claudia, Ricardo y Aurora gracias por estar conmigo y apoyarme durante todos mis estudios, gracias por creer en mí.

A mis sobrinos Elizabeth, Yoset, Alan Uriel, Zareth Amauri y Johan Yael por hacerme recordar esos hermosos momentos de mi infancia

A mi novia Eva Hernández González por entenderme y apoyarme en todo.

Los amo a todos.
Joel Hernández Bedolla

Agradecimientos

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del estado de Michoacán por la beca otorgada.

A la Coordinación de investigación Científica por el apoyo del presente trabajo.

Al Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro por la valiosa información proporcionada para hacer posibles la realización de esta tesis.

Al director de la CONAGUA Wilfrido Vallejo Domínguez por su atención y la información que nos facilitó y que nos ha permitido realizar el estudio para las condiciones actuales.

Al Instituto Nacional de Ecología por sus publicaciones y disponibilidad en sus bases de datos.

A mi directora de tesis Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por el apoyo y su conocimiento transmitido que me han permitido el desarrollo de esta tesis.

A M.C. Mario Alberto Hernández Hernández por transmitirme sus conocimientos.

Al Departamento de Hidráulica en especial a todos los profesores y técnicos académicos que han estado para ayudar en mi crecimiento en esta área del conocimiento.

A todos mis profesores que contribuyeron con su conocimiento y experiencia a mi formación como Ingeniero Civil.

A todos los prestadores de servicio social y verano de la investigación por el apoyo que me brindaron para la terminación de mi tesis.

A todos mis compañeros de la sección 01 y amigos que me han animado para finalizar mis estudios y concluirlos de manera exitosa.

Resumen

En la actualidad todas las decisiones acerca de la planificación de los recursos hídricos dependen de las condiciones climáticas, más sin embargo el clima pasado y actual, no presentará las mismas características y variabilidad que en un futuro. Por lo tanto el diseño, la construcción de nueva infraestructura hidráulica, la operación de embalses, las diferentes cuotas a los usuarios y el manejo del agua que se tiene en la actualidad podría ser insuficiente o inadecuado. Es muy importante incorporar el efecto del cambio climático en la gestión de las cuencas desarrolladas, ya que el ciclo hidrológico se verá afectado de manera importante en un futuro.

Para la gestión de los recursos hídricos es necesario contar con el apoyo de herramientas informáticas como los sistemas de apoyo a la decisión, que son necesarios hoy en día para una toma de decisión rápida y eficiente, la mejor decisión es el resultado de evaluar diferentes escenarios de decisión y seleccionar el más adecuado.

El plantel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) proporciona escenarios de cambio climático que indican para México una disminución de la precipitación y un aumento en la temperatura, debido a estos cambios la disponibilidad del recurso hídrico se verá afectada de manera importante.

En esta tesis se hace un análisis integral de la modelación del sistema superficial y subterráneo, por lo tanto es necesario del empleo de diversos modelos de simulación anidados de forma secuencial, debido al elevado nivel de complejidad y de interacción de los distintos elementos que conforman los sistemas de recursos hídricos.

Es importante hacer un análisis de los diferentes escenarios de cambio climático que proporciona el IPCC, así como los escenarios climáticos regionales, desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM) mediante el modelo regional Climate Predictability Tool (CPT). Estos escenarios nos permiten analizar de manera estacional el cambio en la precipitación y la temperatura para todo México. En base a estos escenarios podremos conocer la evolución del ciclo hidrológico y la disminución en las aportaciones, recargas y evolución del acuífero a través del modelo lluvia escurrimiento Témez y el método de los autovalores. Simultáneamente a este cálculo es posible calcular las demandas urbanas y agrícolas actuales y futuras mediante la metodología de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) respectivamente.

Una vez realizado en análisis cuantitativo del sistema de recursos hídricos se realiza el sistema de gestión de los recursos hídricos mediante el modelo de gestión Aquatool y evaluar las garantías y fallos en los suministros a las diferentes demandas que se tengan en el sistema. De esta manera podemos conocer las repercusiones que tendrá el cambio climático en el sistema de explotación, donde las principales variables analizadas son las demandas de riego, las evapotranspiraciones, la disminución en las aportaciones, la disminución en el volumen medio mensual en los embalses, los niveles estáticos del acuífero y las garantías y fallos que se producen en las demandas industriales, agrícolas y urbanas.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Justificación	3
2. HISTORIA DEL ARTE DEL CAMBIO CLIMÁTICO	4
2.1 El Efecto Invernadero	6
2.2 Gases de Efecto Invernadero	7
2.3 Posibles efectos del cambio climático.....	15
2.3.1 Efectos del cambio climático en los componentes del ciclo hidrológico.	17
2.3.2 Efectos del cambio climático en diferentes regiones climáticas.....	25
2.3.3 Efectos del cambio climático en diversos sectores debido a la variación de los recursos hídricos.	26
2.3.4 El papel del agua en la economía.....	29
2.3.5 Agua en la sociedad.....	30
2.3.6 Tecnología y agua	30
2.3.7 Efectos de cambio climático en la planificación y el manejo de los recursos hídricos	31
2.3.8 Factores modificables y no modificables de los recursos hídricos.	32
2.3.9 Cambios en las políticas de los sectores debido al cambio climático	32
2.4 Modelos de circulación general de la atmosfera.	33
2.4.1 Definición de Escenario.	35
2.4.2 Tipos de escenarios para estudios de cambio climático.	36
2.4.3 Escenarios climáticos.....	42
2.4.4 Proyecciones de los cambios futuros en la temperatura en base a los MCGAO-A.....	43
2.4.4.1 Proyecciones de los cambios en la precipitación a partir de los MCGAO-A.	46
2.4.4.2 Principales MCGAO-A Modelos de Circulación General Atmosfera Océano Atmosfera.....	48
2.4.4.3 Escenarios de cambio climático a partir de los modelos climáticos regionales.	52
2.4.4.4 La Herramienta de Predicción del Clima (CPT) para la reducción de escala.....	55
2.4.4.5 Escenarios de cambio climático para México mediante modelos regionales de clima.	57
2.4.4.6 Escenarios mediante el modelo regional de clima CPT.....	57

2.4.4.7 Escenarios Ensamble para México.	59
2.4.4.8 Escenario ensamble de temperatura regionalizado (CPT).	59
2.4.4.9 Escenario ensamble de precipitación regionalizado (CPT).	62
2.4.4.10 Escenarios de cambio climático regionalizados para Michoacán.	64
2.5 Estudios de evaluación de los efectos del cambio climático realizados en México.	66
3 METODOLOGÍA.....	67
3.1 Selección de escenarios climáticos.	70
3.2 Modelo lluvia escurrimiento	72
3.3 Requerimiento de cultivos	74
3.4 Demanda urbana.....	77
3.5 Modelo de autovalores	77
3.6 Sistema de gestión de recursos hídricos AQUATOOL/ SIMGES	79
4 ZONAS DE ESTUDIO	82
4.1 Cuenca del río grande de Morelia	82
4.2 Acuífero Morelia-Queréndaro.....	84
4.2.1 Fisiografía	86
4.2.2 Geomorfología	87
4.2.3 Geología	87
4.2.4 Estratigrafía	87
4.2.5 Geología estructural.....	90
4.2.6 Geología del subsuelo	91
4.2.7 Tipo de acuífero.....	91
4.2.8 Volumen concesionado.....	92
4.3 Población de la cuenca del Río Grande de Morelia y del Acuífero Morelia-Queréndaro.....	93
4.4 Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.	94
4.4.1 Infraestructura hidráulica.....	98
4.4.2 Programación y suministro a la demanda.....	102
4.4.3 Eficiencia del sistema de riego	104
4.5 Planta Industrial de Celulosa y Papel de Michoacán S.A. de C.V. (CEPAMISA).....	107
4.5.1 Problemática de calidad del Agua.....	107
5 APLICACIÓN A LAS ZONAS DE ESTUDIO	108
5.1 Escenarios de cambio climático	108

5.1.1 Selección de escenarios.....	110
5.2 Obtención de la evapotranspiración.....	124
5.3 Resultados del modelo de Témez	126
5.3.1 Calibración del modelo.....	126
5.3.2 Resultados de los cambios en las aportaciones	129
5.3.3 Recarga al acuífero Morelia-Queréndaro	135
5.4 Resultados de la modelación del acuífero Morelia Queréndaro mediante AQUIVAL.	138
5.4.1 Discretización del acuífero Morelia-Queréndaro.....	138
5.4.2 Hipótesis del acuífero Morelia-Queréndaro.	139
5.4.3 Modelo de diferencias finitas en AQUIVAL.	139
5.4.4 Definición de acciones elementales.....	141
5.4.5 Definición de los parámetros de control.....	142
5.4.6 Simulación y calibración	143
5.5.- Resultados de las demandas agrícolas mediante CROPWAT.....	145
5.5.1 La evapotranspiración de cultivo (ETc.)	146
5.5.2 Temperatura máxima y mínima.....	147
5.5.3 Precipitación total mensual.....	148
5.5.4 Cultivos analizados	149
5.5.5 Suelo.....	149
5.5.6 Patrón de cultivo y Programación.....	150
5.5.7 Resultados para los diferentes cultivos.....	150
5.5.8 Requerimientos de los Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.	157
5.5.8.1 Resultados para la demanda actual y futura.....	158
5.5.9 Salidas naturales del Acuífero	165
5.6 Incremento en la población y la demanda urbana	166
5.7 Cambios en el embalse Cointzio.	169
5.7.1 Incremento en la evaporación.	169
5.7.2 Disminución de la capacidad.....	171
5.8.- Resultados de la simulación conjunta para los diferentes escenarios mediante AQUATOOL (SIMGES).....	174
5.8.1 Modelo de simulación y calibración.....	174
5.8.2 Resultados para los escenarios de cambio climático.....	178

5.8.3 Análisis de resultados de garantías mediante diferentes criterios de Evaluación para las demandas agrícolas.....	180
5.8.4 Análisis de resultados para la demanda urbana por medio del criterio IPH 2008.....	186
5.8.5 Análisis de resultados para la demanda industrial.....	187
5.8.6 Descenso del nivel estático en el acuífero Morelia-Queréndaro.....	188
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	190
6.1 Conclusiones de los resultados obtenidos.....	191
6.2 Posibles soluciones al efecto del cambio climático.....	192
6.2.1 Problemática de la demanda urbana.....	192
6.2.2 Problemática en la demanda agrícola.....	194
6.2.3 Problemática en el acuífero Morelia-Queréndaro.....	194
7. BIBLIOGRAFÍA.....	196

ANEXOS EN FORMATO DIGITAL

ANEXO A. Estaciones climáticas para el análisis de la cuenca del río Grande de Morelia y el acuífero Morelia Queréndaro.

ANEXO B. Análisis de los escenarios de cambio climático para la cuenca del río Grande de Morelia y el acuífero Morelia Queréndaro.

ANEXO C. Evapotranspiración para las subcuencas de la cuenca del río Grande de Morelia.



1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El concepto de cambio climático, surge por primera vez en el siglo XIX, como resultado de estudios geológicos que encontraron que desde épocas prehistóricas, la tierra había sufrido varios cambios de clima. Por mucho tiempo, los primeros cálculos del impacto humano sobre los cambios en el clima se discutieron acaloradamente, pero fue en los años 1960 que la evidencia científica comenzó a apoyar la noción de que las actividades humanas pudieran en realidad afectar el clima global. Con el crecimiento paulatino de la base científica, se precisó que el aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO₂), y otros gases de efecto invernadero pudieran provocar fluctuaciones de temperatura futuras. Pero fue hasta finales de los años 80s que se comenzó a entender que estos cambios ya estaban empezando a suceder.

Las evidencias llevaron a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), a crear en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Por otra parte, la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue creada en la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, entrando en vigor en 1994. Actualmente cuenta con 195 Estados, que se han reunido anualmente desde el 1995 en la Conferencia de las Partes (COP). Donde el enfoque inicial era la mitigación de las causas de origen antropogénico, más sin embargo al observar que el cambio del clima se hacía más evidente la adaptación a los efectos de estos cambios se vuelve muy importante principalmente para los países en vías de desarrollo (CONAGUA 2010).

Las consecuencias del cambio climático para México son dos, fundamentalmente el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación, y en consecuencia a estos cambios se presentan alteraciones muy importantes en los sistemas de recursos hídricos debido a que son las dos variables más importantes para el desarrollo de cuencas.

Las proyecciones para México bajo el Special Report on Emissions Scenarios (SRES) reporte especial sobre escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) presentan un incremento de temperatura superficial del mismo modo que con el patrón global, hacia latitudes más altas y sobre regiones continentales. Prácticamente todas las realizaciones indican un cambio positivo. Los escenarios más críticos proyectan el periodo de tiempo 2010-2039, aumentos en la temperatura en la mayor parte de México son alrededor de 0.5 a 1°C con una dispersión de 0.5°C. Entre los años 2040-2069 el aumento promedio proyectado entre modelos se encuentra entre 2° y 2.5°C, con mayores aumentos hacia el norte de México. Y, hacia finales del presente siglo, entre el 2070 y el 2099, los aumentos llegan a ser de entre 2.5 y 3.7°C en el norte de México.



En el caso de la precipitación en México las anomalías respecto a la climatología construida en el periodo 1970-1990 alcanzan -20% para los años 2010-2039, un -25% para 2040-2069 y hasta un 30% menos de lluvia en el acumulado anual bajo el escenario más crítico.

Como consecuencia de estos cambios en las temperaturas y las precipitaciones se espera aumente la presión sobre los recursos hídricos, con un amplio panorama de consecuencias para los seres humanos y el medio ambiente. Al modificar el ciclo del agua, la humedad del suelo, la evapotranspiración, el escurrimiento, la evaporación, la recarga a los acuíferos, entre otros. Además el cambio climático tendrá como consecuencia condiciones más extremas, que se traducirán en un exceso de precipitaciones en algunos lugares, a menudo en lapsos muy cortos (provocando inundaciones), y en periodos prolongados de escasez en otros (provocando sequías). Paul Dickinson (2010), afirma “Si el cambio climático es un tiburón, sus dientes son el agua”, por tal motivo la gestión de los recursos hídricos es la mejor forma de adaptación al cambio climático.

Al verse afectados estos procesos naturales las demandas se incrementan y los suministros de agua se reducirán por lo tanto afectando los sistemas de recursos hídricos e hidráulicos influyendo en la operación de embalses y la utilización de agua de riego que es la más importante para México y la que se verá mayormente afectada por el cambio climático.

Finalmente todos estos cambios pueden ocasionar que la infraestructura hidráulica actual puede resultar inadecuada e ineficiente si cambian las condiciones climáticas. Los procedimientos utilizados para la operación y la gestión de los sistemas dependen específicamente del clima y, por lo tanto, limitan la flexibilidad de respuesta a los cambios, si se presentan fenómenos meteorológicos extremos, por eso es necesario contar con estudios que evalúen los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos y así contar con herramientas que ayuden a planificar, gestionar y, en su caso, mitigar los efectos que tendrían los cambios climáticos en los recursos hídricos.





1.2 Objetivos

El objetivo primordial de la elaboración de esta tesis es analizar de manera integral cuantitativa el efecto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos, y que nos permita conocer el efecto en los cambios en las demandas urbanas y agrícolas, en la disponibilidad del agua superficial y subterránea, en las aportaciones de la cuenca, en las recargas al acuífero, en la evaporación (embalse) y evapotranspiración (cuenca y Módulos de riego). Mediante un modelo de gestión podemos evaluar las garantías y los fallos que se producen en las demandas agrícolas, urbanas e industriales, así como observar la evolución del acuífero y los embalses que nos permiten observar el estado general de los recursos hídricos.

1.3 Justificación

En México son escasos los estudios que evalúen los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de manera integral y que analicen la evolución de las diferentes demandas que se pueden presentar en cuencas desarrolladas. Los pocos estudios de los que se tiene conocimiento se analiza de manera muy general la disponibilidad del agua. Por tales motivos de muy necesario comenzar a hacer estudios en México sobre las posibles variaciones de los recursos hídricos para las variaciones climáticas que se pueden presentar en un futuro.



2. HISTORIA DEL ARTE DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es un fenómeno que se ha venido desarrollando con características que son únicas. Sus alcances son de escala global y sus impactos a largo plazo se incrementarán ya que involucra interacciones complejas entre procesos naturales, políticos, económicos y sociales a escala mundial.

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. En ocasiones puede ocurrir que un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura se desvíe de su valor medio de muchos años, hablando de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana. El clima puede variar de muchas formas, por tal motivo, pronosticarlo a largo plazo no es fácil.

La Tierra absorbe radiación de onda corta o radiación solar, principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos. La energía recibida es re-emitida al espacio (lo que se conoce como radiación de onda larga) para mantener en el largo plazo, un balance entre energía recibida y re-emitida. Cualquier proceso que altere este balance, (sea por cambios en la radiación recibida o re-emitida), o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. A tales cambios se les conoce como forzamientos radiativos. Cuando éstos son positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra. Un enfriamiento se producirá si el forzamiento radiativo es negativo.

El aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) reducen la eficiencia de la Tierra para re-emitir la energía al espacio. Parte de esta radiación de onda larga es re-emitida a la superficie por la presencia de estos gases. Por tal motivo la temperatura de la superficie se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede atrapada, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiativo y de esta manera mantener estable el clima.

Si las concentraciones de gases de efecto invernadero aumentan, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva. En caso de que las emisiones de estos gases se estabilicen, los efectos del calentamiento perdurarán mucho tiempo, debido a que los gases de este tipo tienden a permanecer por periodos de largo tiempo en la atmósfera.

En la actualidad no queda duda de que la temperatura global del planeta está aumentando y de que los regímenes de lluvia están cambiando. Es importante mencionar que en escalas de tiempo de miles o millones de años las concentraciones en gases de efecto invernadero cambiaron considerablemente de manera natural, produciendo importantes variaciones en la temperatura, más sin embargo éstas se produjeron en millones de años.



Nunca como ahora, los cambios drásticos en el clima se produjeron en escalas tan cortas de tiempo. De mediados del siglo XIX a la fecha, la actividad humana ha provocado aumentos globales de la temperatura del orden de $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2001).

El efecto invernadero, ha aumentado por la emisión de sustancias conocidas como gases de efecto invernadero. Se cree que esto llevará a un calentamiento global más allá de las fluctuaciones climáticas normales. El efecto invernadero se manifiesta sobre todo en el aumento de la temperatura. En la figura 2.1 se aprecia el incremento de la temperatura media en el planeta presentado en los últimos 120 años, que se interpreta como calentamiento global.

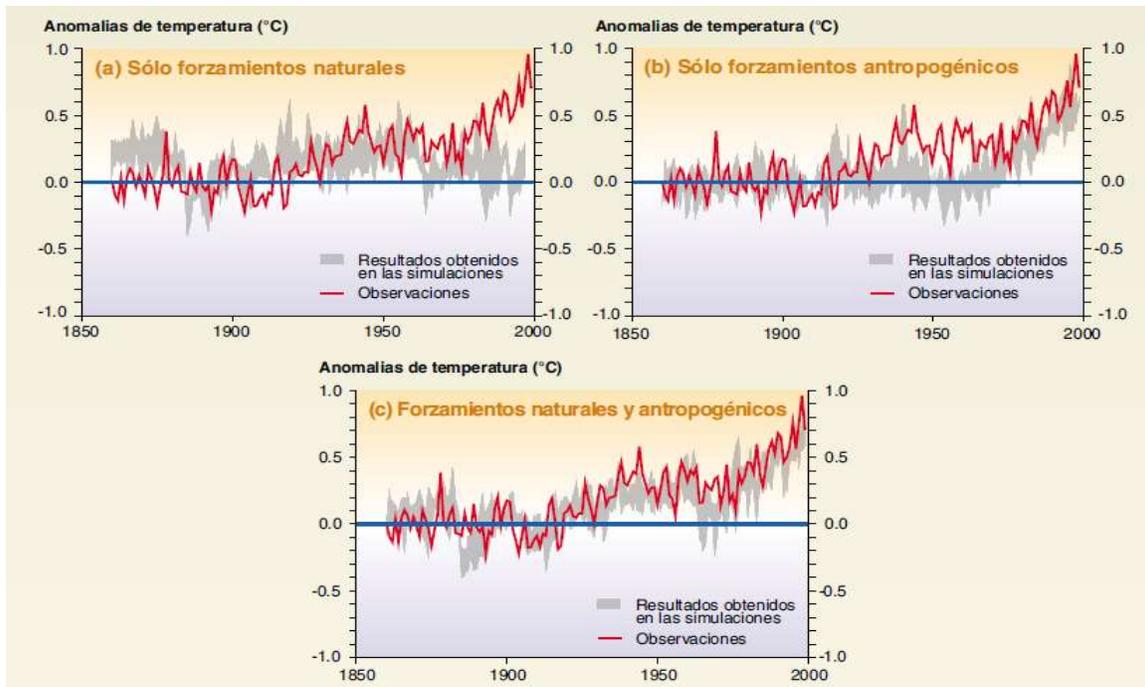


Figura 2.1. Comparación entre las simulaciones del aumento de la temperatura desde el año 1860 y el aumento observado (IPCC 2001).

El Planel intergubernamental de cambio climático reporta en el Tercer Informe de evaluación sobre el cambio climático (TAR, por sus siglas en inglés), que los aumentos en las temperaturas más importantes se han producido en las regiones continentales, principalmente en los valores de las temperaturas mínimas. En los océanos el incremento de temperatura también ha aumentado. Las observaciones también indican que los aumentos son mayores en las latitudes medias. Este efecto tiene su origen en los cambios de la cubierta de hielo y nieve registrados en décadas recientes a esas latitudes.

En 1988 se estableció el Planel intergubernamental de cambio climático (IPCC) de la Organización de Naciones Unidas, que define el cambio climático como “El cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmosfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.



2.1 El Efecto Invernadero

Todos los cuerpos emiten radiación; estos rayos o fotones son ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance. Como cualquier onda, las electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda o alternativamente por su frecuencia, siendo ambas cantidades inversamente proporcionales. Una onda larga es de baja frecuencia y una corta es de alta frecuencia.

En la atmósfera actúan dos tipos de radiación claramente distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja (invisible) emitida por la Tierra. La enorme diferencia entre ellas se debe a la gran diferencia de temperaturas: el Sol emite su radiación como a 6 mil grados centígrados (°C); en cambio, los elementos de la Tierra lo hacen a temperaturas que andan alrededor de 0°C. Por esta gran diferencia en su longitud de onda, a la radiación solar se le llama de onda corta, y a la terrestre, de onda larga, constituyendo espectros francamente ajenos.

El efecto invernadero resulta que el aire es muy transparente para la radiación de onda corta y muy opaca a la de onda larga. O sea que la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie, que se calientan en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre, que es absorbida por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas y las nubes van sucesivamente absorbiendo, calentándose y re-emitiendo hacia arriba y hacia abajo radiación térmica procedente de abajo. El resultado de este complejo mecanismo es sencillo: la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme uno asciende a través de ella.

El balance de energía del sistema climático a manera de porcentaje lo podemos expresar de la siguiente manera. De cada 100 unidades del flujo total de radiación solar (o de onda corta) que llega al tope de la atmósfera, 23 unidades son absorbidas por ésta, de las cuales, 4 unidades corresponden al agua líquida en las nubes y 19 unidades corresponden al oxígeno estratosférico y al vapor de agua troposférico. La superficie de los océanos y los continentes absorben 46 unidades. Las 31 unidades restantes se reflejan a hacia el espacio exterior, de las cuales, 8 unidades que están constituidas por los gases que componen la atmósfera, se dispersan hacia el espacio exterior, 17 unidades son reflejadas por las nubes y las 6 unidades restantes son reflejadas por la superficie del planeta.

De la energía absorbida por el sistema climático, las primeras 69 unidades son convertidas en calor, debido al movimiento de la atmósfera (energía cinética) y de los océanos (energía potencial). Las restantes 31 unidades no participan en los procesos e interacciones del sistema climático (Peixoto, J.P. y A.H. Oort,).

De las 115 unidades de radiación de onda larga, 106 son absorbidas por los GEI, y sólo 9 unidades escapan hacia el espacio exterior. Adicionalmente, la atmósfera recibe desde la superficie un flujo de calor sensible de 7 unidades y 24 unidades de calor latente.

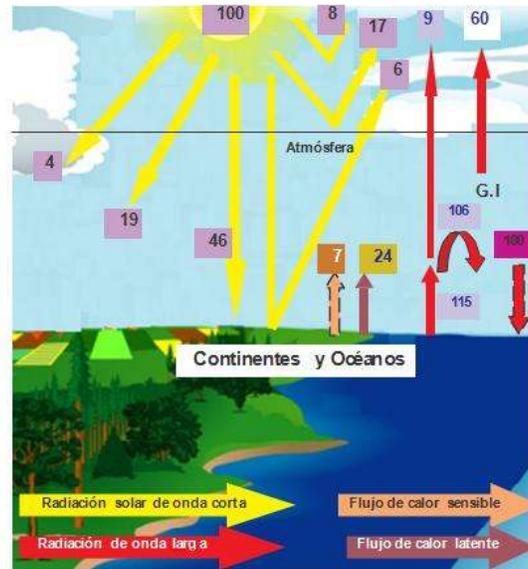


Figura 2.2. Esquema del balance de calor del sistema climático (Fuente: Peixoto, J.P. y A.H)

La radiación de onda larga absorbida por los GEI (106 unidades) es irradiada nuevamente en todas direcciones. 60 unidades son irradiadas hacia el espacio exterior contribuyendo al enfriamiento del sistema tierra-atmósfera. La parte re-irradiada hacia la superficie de la tierra (100) unidades reduce su pérdida de calor e incrementa la temperatura de la tierra. Esto explica el denominado efecto invernadero (Peixoto, J.P. y A.H. Oort,).

2.2 Gases de Efecto Invernadero

Para realizar una comparación de la contribución de cada sector de la economía al total de las emisiones del país, es necesario estandarizarlas con un indicador común. El concepto que permite hacer esto es el de “Potencial de Calentamiento Global (PCG)”. Se denomina gases de efecto invernadero a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la Tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera. Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su PCG.

Los gases de efecto invernadero se dividen en gases de efecto directo e indirecto. Los de efecto indirecto son aquellos que tienen capacidad para influir en la concentración atmosférica de otros gases de efecto invernadero; por ejemplo, el ozono, el cual además de su carácter oxidante en la atmósfera baja, también puede atrapar radiación infrarroja y filtrar la radiación ultravioleta.

Los gases de efecto invernadero directo son el bióxido de carbono (CO_2) con un 76%, el metano (CH_4) con 13%, el óxido nitroso (N_2O) con 6%.y los halocarbonos con 5%. Entre los halocarbonos se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón (CCl_2F_2) que es uno de los gases controlados por el Protocolo de Montreal por sus efectos en la capa estratosférica de ozono; y los compuestos



diseñados para sustituirlos, los hidroclorofluorocarbonos. Los compuestos de efecto invernadero indirecto son los óxidos de nitrógeno (NOx), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos. Estos últimos compuestos son precursores de ozono y se deben regular en las zonas urbanas para controlar la formación de ozono y partículas suspendidas. Sólo a los gases de efecto invernadero directo se les puede asignar un PCG. La formación de ozono a partir de sus precursores no guarda una relación lineal y por ello no se puede asignar un factor de conversión. El PCG cambia dependiendo del escenario de tiempo que se desea comparar. El acuerdo internacional es usar un escenario a 100 años. El compuesto de referencia es el CO₂, y el PCG establece a cuántos gramos de CO₂ equivale un gramo de otro compuesto (tabla 2.1).

Gas		vida media (años)	Potencial de calentamiento global Horizonte temporal		
			20 años	100 años	500 años
Bióxido de carbono	CO ₂	-	1	1	1
Metano	CH ₄	12	62	23	7
Óxido nitroso	N ₂ O	114	275	296	156
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	10200	10600	5200
HCFC-21	CHCl ₂ F	2	700	210	65

Tabla 2.1 Potenciales de calentamiento global en relación con el bióxido de carbono para los principales gases de efecto invernadero (fuente IPCC 2001).

El cambio climático fundamentalmente, es producto de la industrialización y de los patrones de consumo de los países desarrollados y en vías de desarrollo. Evidencia de esto son las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en la atmósfera a escala global, los cuales han aumentado considerablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y en la actualidad exceden por mucho los valores preindustriales, los cuales se determinaron mediante el análisis de núcleos de hielo acumulados durante miles de años (Figuras 2.3 a 2.5).

En 2005, las concentraciones de CO₂ y CH₄ en la atmósfera excedieron considerablemente del intervalo de valores naturales de los últimos 650.000 años. El aumento mundial de las concentraciones de CO₂ se debe principalmente al uso de combustibles de origen fósil, con una aportación menor, aunque perceptible, de los cambios de uso de la tierra. Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y al uso de combustibles fósiles. El aumento de la concentración de N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas.

Los sectores más importantes que contribuyen a las emisiones de los GEI son la agricultura, el suministro de energía, el transporte, industrias, silvicultura, desechos y aguas de desechos así como los edificios residenciales y comerciales.

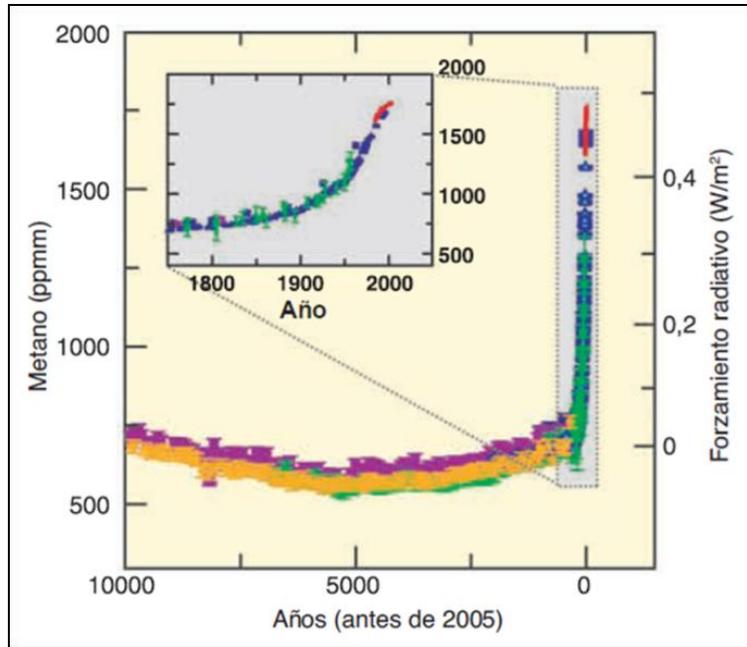


Figura 2.3. Concentraciones de CH_4 , en la atmósfera durante los últimos 10.000 años en el recuadro interior se muestra a partir de 1970. Fuente IPCC 2007.

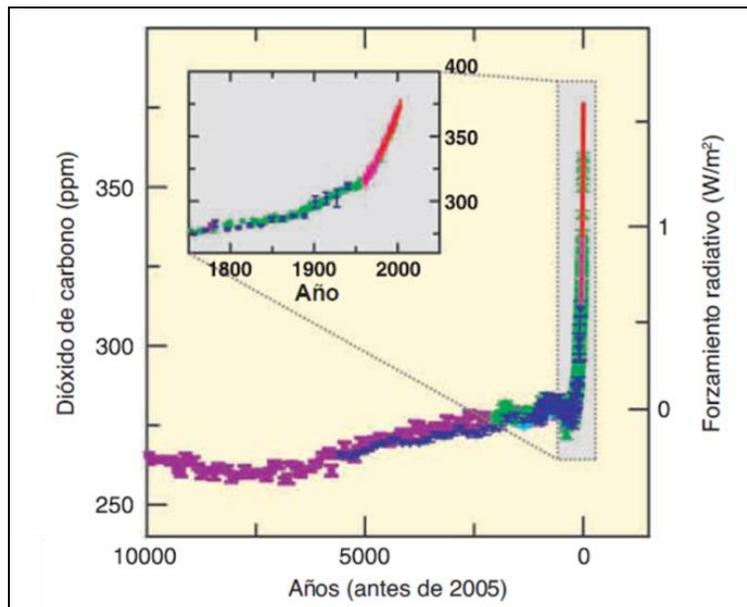


Figura 2.4. Concentraciones de CO_2 , en la atmósfera durante los últimos 10.000 años en el recuadro interior se muestra a partir de 1970. Fuente IPCC 2007.

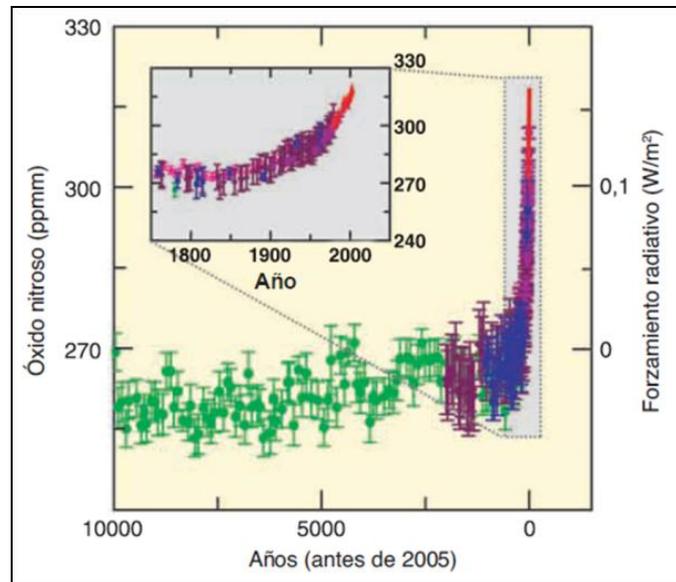


Figura 2.5. Concentraciones de N₂O, en la atmósfera durante los últimos 10.000 años en el recuadro interior se muestra a partir de 1970. Fuente IPCC 2007.

Las emisiones mundiales de GEI causadas por actividades humanas han aumentado según los registros desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 (Figura 2.6).

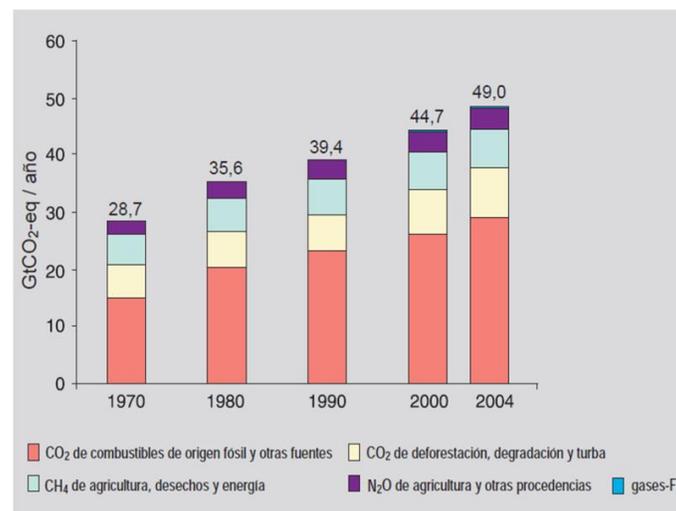


Figura 2.6 Emisiones mundiales anuales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. Fuente IPCC 2007.

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropógeno más importante. Entre 1970 y 2004, sus emisiones anuales han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaban un 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos (Figura 2.2). Durante el reciente decenio 1995-2004, la tasa de crecimiento de las emisiones de CO₂-eq fue mucho mayor (0,92 GtCO₂-eq anuales) que durante el período anterior de 1970-1994 (0.43 GtCO₂-eq anuales).

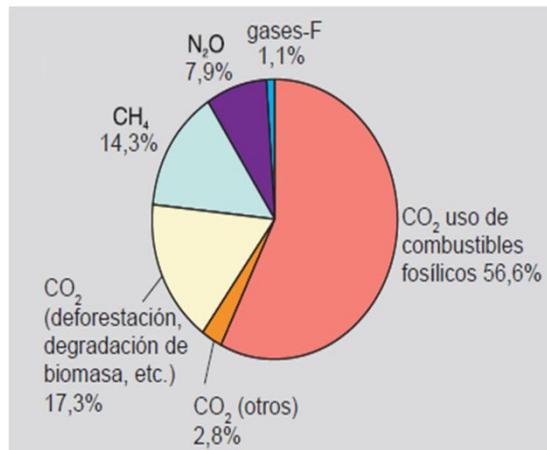


Figura 2.7. Parte proporcional de diferentes GEI antropógenos en las emisiones totales en el año 2004, en términos de CO₂-eq. Fuente IPCC 2007.

Entre 1970 y 2004, el aumento más importante de las emisiones de GEI proviene de los sectores de suministro de energía, transporte e industria, mientras que la vivienda y el comercio, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura han crecido más lentamente. Las fuentes de GEI en 2004 aparecen indicadas en la figura 2.5 clasificadas por sectores.

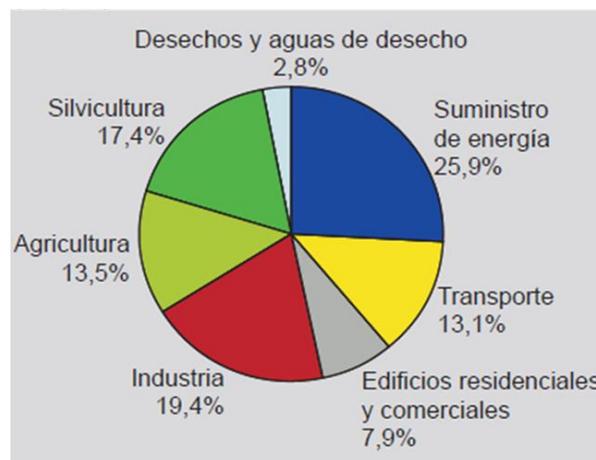


Figura 2.8. Parte proporcional de diversos sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO₂-eq. Fuente IPCC 2007.

El calentamiento generalizado observado en la atmósfera y en el océano, junto con la pérdida de masa de hielo, refuerzan la conclusión de que es extremadamente improbable que el cambio climático mundial de los últimos cincuenta años sea explicable en ausencia de un forzamiento externo, y muy probable que no se deba exclusivamente a causas naturales conocidas.

Durante ese período, la suma de los forzamientos solares y volcánicos habría producido probablemente un enfriamiento, y no un calentamiento. El calentamiento del sistema climático ha



sido detectado en los cambios de temperatura de la superficie, de la atmósfera, y de la capa superior del océano hasta una profundidad de varios centenares de metros. La pauta observada del calentamiento troposférico y del enfriamiento estratosférico se debe muy probablemente a la influencia conjunta de los aumentos de GEI y al agotamiento del ozono de la estratosfera. Es probable que el aumento de las concentraciones de GEI haya causado por sí solo un calentamiento mayor del observado, ya que los aerosoles volcánicos y antropógenos han compensado parte del calentamiento.

Es probable que se haya producido un calentamiento antropógeno importante durante los últimos cincuenta años, en promedio para cada continente. La evolución del calentamiento, particularmente se ha experimentado en tierra firme, así como su variación a lo largo del tiempo, son simulados únicamente mediante modelos que incorporan forzamientos antropógenos. Ningún modelo climático mundial acoplado basado únicamente en forzamientos naturales ha conseguido reproducir las tendencias del calentamiento medio de los distintos continentes (excepto la Antártida) durante la segunda mitad del siglo XX.

La gran variabilidad natural del clima es relativamente mayor que en periodos de tiempo pasado, por lo que resulta más difícil discernir los cambios esperados por efecto de forzamiento externo. De igual manera, las incertidumbres de los forzamientos locales vinculados, por ejemplo, a los aerosoles o a los cambios de uso de la tierra, y de los retro-efectos hacen difícil estimar la contribución de los aumentos de GEI a los cambios de temperatura observados en pequeñas escalas.

Las actividades humanas se presentan a una escala que comienza a interferir con sistemas naturales, como el clima. El cambio climático es un asunto complejo y de enorme dificultad; por ello, los responsables de políticas necesitan una fuente de información objetiva acerca de las causas del cambio, sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas. Conscientes de esta necesidad, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) constituyen en 1988 el IPCC.

El Grupo de Expertos, formado por más de 2.500 científicos procedentes de 190 países, es un órgano intergubernamental abierto a todos los países miembros del PNUMA y de la OMM, el cual decide su estructura, principios, procedimientos y programa de trabajo. Celebra reuniones plenarias aproximadamente una vez al año, y a ellas suelen asistir centenares de representantes de gobiernos y de organizaciones participantes.

La función principal del IPCC es evaluar la información importante para la comprensión del riesgo al cambio climático por inducción humana, para ello se basa en la evaluación, publicación y revisión de literatura científica-técnica.

El IPCC se estructura en tres grupos de trabajo y un Equipo especial sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero:

Grupo de trabajo I: evalúa los aspectos científicos del sistema climático y del cambio de clima.



Grupo de trabajo II: examina los aspectos científicos, técnicos, medioambientales, económicos y sociales de la vulnerabilidad (sensibilidad y adaptabilidad) al cambio climático de los sistemas ecológicos, de los sectores socioeconómicos y de la salud humana, así como las consecuencias negativas y positivas (impactos) para aquéllos, dando especial preponderancia a las cuestiones regionales, sectoriales y transectoriales.

Grupo de trabajo III: evalúa las opciones que permitirían limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y atenuar por otros medios los efectos del cambio climático.

La contribución principal del IPCC es la presentación de reportes de evaluación que contienen aspectos científicos, técnicos, económicos y sociales asociados al sistema climático y al cambio climático. A la fecha se han presentado cuatro reportes:

- Primer Reporte de Evaluación en 1990
- Segundo Reporte de Evaluación en 1995
- Tercer Reporte de Evaluación en el 2001
- Cuarto Reporte de Evaluación en el 2007

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptada en mayo de 1992 y entró en vigor en marzo de 1994. Los países adheridos hasta la actualidad son 195. Permite, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública, a escala mundial, así como la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático

Los principios jurídicos en los que se basa la Convención de las Naciones Unidas sobre cambio climático son:

1. El principio de precaución. El cual afirma que, a falta de certeza científica no constituye razón para posponer acciones dirigidas a evitar daños potencialmente serios o irreversibles al ambiente.
2. El principio de responsabilidades comunes pero diferentes. Consiste en admitir la adopción de estándares diferentes, plazos de cumplimiento distintos y compromisos menos exigentes para los países en vías de desarrollo.

A partir de 1995 y cada año se realiza la Conferencia de las Partes (CP) la cual se encarga de mantener los esfuerzos internacionales por resolver los problemas del cambio climático. Examina la aplicación de la Convención y los compromisos de las Partes en función de los objetivos de la Convención, los nuevos descubrimientos científicos y la experiencia conseguida en la aplicación de las políticas relativas al cambio climático. Una labor fundamental de la CP es examinar las comunicaciones nacionales y los inventarios de emisiones presentados por las Partes. Tomando como base esta información, la CP evalúa los efectos de las medidas adoptadas por las partes y los progresos realizados en el logro del objetivo último de la convención.

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂),



gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), en un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990.

El protocolo de Kioto fue inicialmente adoptado el en diciembre de 1997 en Kioto, Japón pero no entró en vigor hasta e de febrero de 2005. En noviembre de 2009, eran 187 estados los que ratificaron el protocolo. EEUU mayor emisor de gases de invernadero mundial no ha ratificado el protocolo.

El mecanismo que plantea el Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones cuenta con tres aspectos importantes:

1. El comercio internacional de emisiones. Este permite a los países industrializados comprar y vender sus emisiones reducidas en caso de que un país no haya sobrepasado su meta de reducción. De esta manera, los que reduzcan sus emisiones más de lo comprometido podrán vender los certificados de emisiones excedentarios a los países que no hayan alcanzado a cumplir con sus compromisos.
2. La implementación conjunta (IC). Los países industrializados pueden vender y comprar entre si las reducciones resultantes de proyectos específicos a través de las “unidades de reducción de emisiones”.
3. El mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Permite a los países industrializados financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo beneficiándose con precios más baratos de reducción. El proyecto debe apoyar el proceso de desarrollo sostenible del país en desarrollo y garantizar que las reducciones sean medibles y de largo plazo.

En la figura 2.9 se muestra la posición de los países con respecto al protocolo de Kioto en donde cabe señalar que EEUU es el único que no han ratificado.

Las llamadas Partes (miembros de la CMNUCC) se reunieron por primera vez para su seguimiento en Montreal, Canadá, en 2005, donde se estableció el llamado Grupo de Trabajo Especial sobre los Futuros Compromisos de las Partes del Anexo I en el marco del Protocolo de Kioto (GTE-PK), orientado a los acuerdos a tomar para después de 2012.

Se llegó a un acuerdo sobre un proceso de dos años, que tiene como objetivo establecer un régimen post 2012 en la XV Conferencia sobre Cambio Climático en diciembre de 2009, en Copenhague, Dinamarca, y un año después en Cancún, México, en Noviembre y Diciembre del 2010. En Cancún los más de 190 países que asistieron a la Cumbre adoptaron, con la reserva de Bolivia, un acuerdo por el que aplazan el segundo período de vigencia del Protocolo de Kioto y aumentan la "ambición" de los recortes. Se decidió crear un Fondo Verde Climático dentro de la Convención Marco que contará con un consejo de 24 países miembros. Éste será diseñado por un comité de transición que formarán 40 países. También se llegó al compromiso de proporcionar 30.000 millones de dólares de financiación rápida, aunque se reconoce la necesidad de movilizar



100.000 millones de dólares por año a partir de 2020 para atender a las necesidades de los países en desarrollo.



Figura 2.9 Posición de los diversos países en 2009 respecto del Protocolo de Kioto. Fuente http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_clim%C3%A1tico

2.3 Posibles efectos del cambio climático

Los principales resultados modelos de cambio climático indican una variación en las precipitaciones y las temperaturas, los cuales condicionarán la cantidad y la calidad del agua en el escurrimiento superficial y recarga de acuíferos.

Para México los escenarios indican una disminución en la precipitación anual y aumentos en la temperatura, esto causará sin duda decrementos en la disponibilidad de los recursos hídricos.

El cambio en las precipitaciones puede afectar la humedad de la superficie, y la vegetación, que luego han de tener repercusiones en la evapotranspiración y la formación de nubes, lo que a su vez afecta a las precipitaciones. Además, el sistema hidrológico responde no sólo a los cambios en el clima y las precipitaciones, sino también a las actividades humanas como la deforestación, la urbanización y la utilización excesiva de los abastecimientos de agua.

En el caso de la calidad del agua incluyendo la disminución en la precipitación, se prevén impactos por la reducción en la dilución de los contaminantes provenientes de descargas puntuales esto debido a la reducción del flujo de los ríos, pérdida en la capacidad de disolución de oxígeno en el agua (por reducción de la turbulencia e incremento de la temperatura), así como incremento en la temperatura del agua (por incremento de la temperatura del aire y reducción en los caudales).

Como consecuencia del calentamiento global, se incrementará la temperatura del agua, como efecto del calentamiento global, el cual está relacionado con un aumento en la toxicidad de



metales y compuestos orgánicos. Algunos indicadores del impacto en la calidad del agua pueden ser el oxígeno disuelto, DBO₅, DQO₅, nitratos, metales, pH y bicarbonatos en cuerpos de agua.

En las diferentes regiones del mundo no ocurren los mismos cambios ya que para las latitudes elevadas se pronostican incrementos de escurrimiento mientras que para latitudes cerca de los trópicos es más difícil pronosticar, más sin embargo tienen una tendencia de reducir la cantidad del agua en los ríos.

El almacenamiento de agua en embalses podría disminuir en la medida en que las lluvias extremas y deslizamientos de terreno estimulan la sedimentación y, de esta manera, reducen la capacidad de depósito. Un aumento en las lluvias extremas e inundaciones también llevaría a que se pierda más agua en forma de escurrimientos. Los cambios en la cantidad y frecuencia de las precipitaciones así como temperatura en los embalses provocan que la calidad del agua disminuya además de acelerar los procesos bioquímicos y una reducción de la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

Las demandas urbanas por su parte, se incrementarán en un futuro, recordando que el crecimiento varía para los diferentes países, estados, municipios y localidades. Más sin embargo las demandas urbanas estarán en un constante crecimiento debido al incremento de la población así como del crecimiento económico. Puede haber excepciones en los países donde se encuentre una marcada emigración. Debido a que la demanda urbana tiene la mayor prioridad para su abastecimiento, otras demandas como las de un sistema de riego se pueden ver mayor afectadas por el cambio climático.

Las demandas en los sistemas de riego estarán condicionadas por dos factores que son los incrementos en las evapotranspiraciones de los cultivos debido al incremento de la temperatura y las temperaturas a las que se pueden producir, viéndose más afectadas las regiones áridas y con temperaturas más extremas.

El manejo de los sistemas de recursos hídricos es otro factor importante y que en los próximos años tomará una mayor importancia ya que será necesario cambiar reglas de operación así como optimizar al máximo los recursos desde el embalse e incrementar la eficiencia en los sistemas de abastecimiento.

Actualmente es necesario considerar el efecto del cambio climático en el diseño de infraestructura hidráulica considerando el efecto del cambio climático ya que no podemos suponer que el ciclo hidrológico se va a comportar de manera similar con los registros históricos. Un reto muy importante es reducir la incertidumbre del cambio climático en la planificación y gestión de recursos hídricos. Para esto es necesaria la gestión integrada de los recursos hídricos en entornos institucionales específicos, aún en ausencia de cambios climáticos, para mejorar la eficiencia en el manejo de los recursos y sistemas hidráulicos. En la práctica, es difícil modificar las prácticas de manejo y gestión de los recursos hídricos en un país cuando no estén bien establecidas las instituciones responsables, ni existan procesos semejantes en sistemas análogos.



La gestión del agua en el futuro en zonas de escasez natural, propondrá retos aún mayores como consecuencia del cambio climático. Es urgente que se realicen estudios regionales para mitigar en lo posible la incertidumbre en los pronósticos, localizar los efectos, definir las medidas de adaptación y priorizar su aplicación en las regiones más sensibles a los efectos del cambio climático.

2.3.1 Efectos del cambio climático en los componentes del ciclo hidrológico.

Precipitación. Es uno de los elementos más importantes en el ciclo hidrológico y el balance del agua. Principalmente, será afectado por el cambio climático en cuanto a intensidad y la cantidad de precipitación. La variabilidad hidrológica se verá afectada por la precipitación anual y mensual en el tiempo. En algunos meses se podrá incrementar la precipitación pero en otros disminuir notablemente, causando problemas en los ecosistemas así como en los lugares donde se tiene algún cultivo y que solamente utiliza riego de temporal. Las frecuencias de las inundaciones son afectadas por los cambios en la variabilidad de la precipitación y por los cambios en las características de las tormentas. Los pequeños caudales en los ríos son consecuencia de los cambios en la distribución espacial de la precipitación.

Entre 1900 y 2005, la precipitación aumentó notablemente en las partes orientales del norte de América del Sur y del Norte, Europa septentrional, y Asia septentrional y central, aunque disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África, en ciertas partes del sur de Asia así como en ciertas zonas de América latina, en resumen la precipitación se reducirá para latitudes medias y latitudes bajas y semiáridas y se incrementará en latitudes altas. En todo el mundo, la superficie afectada por las sequías ha aumentado alarmantemente.

Evapotranspiración. Al incrementarse la temperatura la evaporación y la evapotranspiración se incrementarán notablemente. La evaporación afectará embalses naturales y artificiales, la evaporación del suelo así como la del agua subterránea que se encuentra a poca profundidad y la del agua almacenada en la vegetación a lo largo de la transpiración de las plantas.

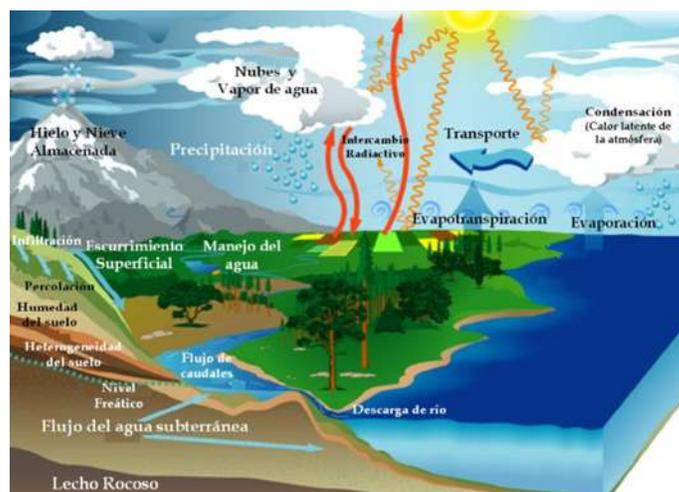


Figura 2.10. Representación de las variables climáticas que se podrían ver afectadas en una cuenca hidrográfica por los efectos del cambio climático. Fuente: <http://cesarciclodelaqua.blogspot.com>.



La evapotranspiración puede medirse a través de instrumentos meteorológicos que toman en cuenta las características del suelo, el agua disponible y las características de la vegetación. También se puede obtener por algunos métodos de manera general y hay métodos con el cual podemos conocer de manera específica para las diferentes zonas de riego. Al introducir el cambio climático sabemos que la temperatura se va a incrementar y esto va a generar un aumento en la evapotranspiración y un descenso en la disponibilidad del agua.

Humedad del suelo. La cantidad de agua almacenada en el suelo es importante para la agricultura y tiene una gran influencia en el escurrimiento superficial, la recarga de acuíferos, así como la evapotranspiración. El cambio climático principalmente al incrementarse la temperatura y darse un cambio de uso de suelo es un cambio en la capacidad de campo y un aumento en la evapotranspiración del mismo lo cual implica mayor cantidad de lluvia para llegar a la humedad máxima que es en este instante donde el agua comienza a escurrir.

Todos los modelos de cambio climático muestran una mayor humedad del suelo en invierno en las latitudes elevadas septentrionales. La mayoría de los modelos producen menos humedad del suelo en verano en las latitudes medias septentrionales, incluidas las zonas importantes de producción de cereales; estas proyecciones son más coherentes para Europa que para América del Norte.



Figura. 2.11. Posibles efectos del cambio climático en la humedad del suelo.

Recarga Subterránea. El agua subterránea, por su naturaleza y abundancia, constituye un recurso estratégico frente a la previsible disminución de los recursos hídricos superficiales, en función de la profundidad a la que se encuentre el nivel estático del acuífero, el tipo de material por el que circula, y su ubicación geográfica. Existen una serie de factores que hacen muy accesible su utilización, como por ejemplo su amplia distribución geográfica, que habitualmente las sitúa próximas al centro de consumo; su fácil adaptación a la demanda hídrica, ya que pueden satisfacer, de un modo rápido y eficaz, excesos puntuales en su demanda; su uniformidad en la calidad química; y su protección ante la agresión de diferentes agentes. Sin embargo, esta protección tiene sus limitaciones, y las características de las aguas subterráneas pueden verse



alteradas por efectos que sean persistentes en el tiempo, como serían los originados por el cambio climático.

El aumento de las temperaturas, y la variación y mayor concentración de las precipitaciones, van a influir tanto en el volumen de los recursos hídricos subterráneos como en su calidad. Así, cabría preguntarse cómo van a influir estos factores en la generación de escurrimiento superficial y en la infiltración del agua en los acuíferos. Por otra parte y en términos generales, parece que el aumento de la evapotranspiración afectará especialmente a aquellos acuíferos que tengan el nivel freático próximo a la superficie del terreno. También la demanda hídrica se prevé que sea mayor, debido al calor y a la menor disponibilidad de agua superficial.

Como consecuencia lógica, el efecto más inmediato consistirá en un descenso generalizado del agua subterránea en el acuífero que conllevaría, según algunos autores (López-Geta, 2008), una menor disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, una modificación de su composición físico-química, distinta forma de manifestarse en el exterior y una alteración de la interrelación con los ecosistemas acuáticos. Por otra parte, podría aumentar la desertificación de los suelos.

El consumo de agua en el mundo casi se ha duplicado en los últimos 50 años. Se estima que de los 4.000 km³/año de agua que utiliza la humanidad, entre 600 y 700 km³/año corresponden a las aguas subterráneas, es decir, entre el 15 y el 18% del agua total (Figura 2.12). Según la UNESCO (2009), los 10 países que utilizan más agua del mundo son India, China, Estados Unidos, Pakistán, Japón, Tailandia, Indonesia, Bangladesh, México y Rusia. Según el mismo organismo, la mitad de las megalópolis del planeta (México DF, Teherán, Shanghai, Lima, Karachi, Dhaka, Manila, El Cairo, Lusaka, Londres, Beijing, etc.), y miles de otras ciudades de tamaño medio en todos los continentes, dependen de las aguas subterráneas o consumen un gran volumen de las mismas. Por lo general, las pequeñas ciudades y las comunidades rurales, utilizan con frecuencia este recurso subterráneo para su abastecimiento doméstico.

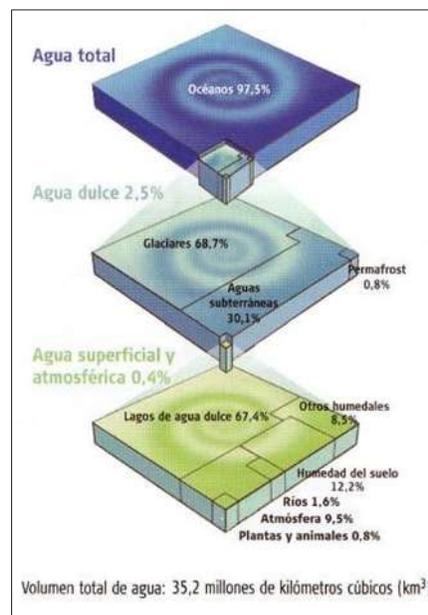


Fig. 2.12 Distribución global del agua en el mundo. (Shiklomanov y Rodda, 2003).



Manantiales. Una disminución generalizada de la entrada y almacenamiento de las aguas subterráneas, llevaría consigo también una disminución de las descargas naturales de éstas, afectando por tanto, a los ecosistemas que dependen de las aguas subterráneas. Las salidas del agua subterránea pueden producirse por la acción del hombre mediante bombes fundamentalmente.

La salida natural se mantiene mientras el nivel freático está por encima de la cota del terreno; cuando se sitúa por debajo, el manantial dejará de surgir. Para que el agua subterránea vuelva a salir, tendrá que recuperar esa cota tras un periodo más o menos prolongado de lluvia, o artificialmente mediante recarga con aportaciones externas. Por tanto, la previsible disminución generalizada de las precipitaciones podría propiciar que determinados manantiales permanentes pasen a estacionales e incluso desaparezcan. Algunos manantiales tienen una notable importancia estratégica ya que permiten atender el suministro de agua potable de un gran número de poblaciones o contribuyen al regadío de muchas zonas, además de ser el origen de cursos de agua más o menos permanentes, humedales, u otros ecosistemas asociados.

Es muy difícil identificar las tendencias de los caudales hidrológicos, por varias razones. Primero, porque la información de las tendencias son cortas y muchos de los datos que se procesan son de cuencas con una larga historia de intervención humana. Segundo, la variabilidad sobre el tiempo en el comportamiento hidrológico es muy alta, particularmente en ambientes secos, y la detección de alguna señal es difícil. Si en una región, una tendencia en los escurrimientos es identificada, sería muy difícil atribuir esta tendencia al cambio climático porque otros factores están en un proceso dinámico.



Fig.2.13. Manantial Mintzita, Morelia, Michoacán, México

Caudales en los ríos. El origen del agua de la mayor parte de los ríos proviene tanto del escurrimiento superficial como de las descargas de los acuíferos. Los caudales de los ríos suelen ser máximos al final del invierno o principios de la primavera, cuando los acuíferos están recargados y, por tanto, con los niveles freáticos altos. Desde finales de la primavera hasta bien entrado el otoño, los niveles descienden progresivamente; estos descensos de niveles pueden



llegar a producir que cesen las descargas, con la consiguiente desecación de las corrientes fluviales. Este proceso natural se verá acentuado con el cambio climático.

Es muy difícil identificar las tendencias de los caudales hidrológicos, por varias razones. Primero, porque la información de las tendencias son cortas y muchos de los datos que se procesan son de cuencas con una larga historia de intervención humana. Segundo, la variabilidad sobre el tiempo en el comportamiento hidrológico es muy alta, particularmente en ambientes secos, y la detección de alguna señal es difícil. Si en una región, una tendencia en los escurrimientos es identificada, sería muy difícil atribuir esta tendencia al cambio climático porque otros factores están en un proceso dinámico.

La falta de datos, particularmente en muchos países en desarrollo, y un análisis de datos consistente hace casi imposible tener un panorama representativo de los patrones y tendencias en el comportamiento hidrológico de los escurrimientos.

Humedales. Dependen de las aguas subterráneas, con o sin aportes de agua superficial, son ecosistemas importantes y productivos que se caracterizan por ser menos fluctuantes que aquellos que sólo dependen del agua superficial. Además, juegan un papel muy relevante en el mantenimiento y conservación de la biodiversidad. La disminución de los recursos hídricos subterráneos puede modificar las condiciones hidrodinámicas del humedal, reducir su superficie e incluso provocar su desaparición. Presentan una vegetación típica que refleja la persistencia de la inundación y el grado de mineralización del agua; a su vez, la vegetación va a condicionar el tipo de fauna. Por otra parte, son ecosistemas muy productivos, que pueden acumular una concentración de carbono por hectárea cinco veces mayor a la que puede haber, en la misma extensión, en un bosque tropical. Por lo tanto, en el caso de que desaparecieran por efecto del cambio climático, constituirían un nuevo foco de emisión de carbono a la atmósfera.

Mar. El aumento del nivel del mar producirá una modificación de la interfaz agua dulce agua salada a favor de una intrusión marina hacia el continente. Este hecho originará un aumento del nivel freático y una degradación de la calidad química del agua subterránea, así como la variación de la disponibilidad de hábitats para muchas especies que se reproducen o alimentan en zonas costeras bajas, que forman humedales costeros. Los ecosistemas más vulnerables serán las playas, los deltas y los humedales litorales. La extracción de aguas subterráneas para abastecimiento de núcleos de población, podría aumentar en estas zonas costeras favoreciendo la intrusión de agua de mar. En los núcleos urbanos próximos al mar, las edificaciones pueden sufrir problemas geotécnicos importantes. Como término general, cada centímetro que aumenta el nivel del mar en la vertical, supone un avance marino de un metro en la horizontal hacia el continente.

Lagos. Los lagos son particularmente vulnerables a los cambios de las variables climáticas. Variaciones en la temperatura, precipitación, y otros componentes meteorológicos causan directamente cambios en la evaporación, balance de agua, nivel del lago, en los regímenes hidro-químicos e hidro-biológicos y en casi todo el ecosistema del lago.



Según Hamerl (2011) las prolongadas sequías y el aumento de la temperatura terrestre acelerarán la desaparición de lagos en España, Filipinas, Argentina, México y el continente africano. Los más vulnerables son los lagos con poca profundidad, ya que están más expuestos a evaporación por las temperaturas altas y tienen menos capacidad de recuperarse.

En gran parte de las lagunas en el mundo se tiene escasez de agua debido a que ésta es desviada indiscriminadamente para uso industrial, agrícola y doméstico. La poca que llega está contaminada por desechos industriales y no es tratada de manera adecuada.

La calidad del agua también será afectada ya que el incremento de las temperaturas y otros elementos climáticos pueden influir gravemente en la circulación inercial de muchas maneras. Estos cambios conducen a niveles más bajos de oxígeno, aumento en la toxicidad de metales y compuestos orgánicos.

Cambio en las sequías hidrológicas. La sequía es una condición normal y recurrente del clima. Ocurre o puede ocurrir en todas las zonas climáticas, aunque sus características varían significativamente de una región a otra. A mayor tiempo sin la presencia de lluvias, la sequía tiende a ser más aguda. Una sequía puede ser incipiente, moderada, severa, crítica y catastrófica. La frecuencia, duración, magnitud, extensión espacial y severidad de la sequía son analizadas nivel de cuenca.

La disminución en la precipitación y el aumento en la temperatura, los vientos fuertes y una baja humedad relativa están frecuentemente asociados con la sequía y ocasionaran en el futuro periodos de sequia mucho más intensos que los que se presentan en la actualidad. También hay otros factores como los cambios en el uso del suelo (la deforestación, agricultura, zonas urbanas), la quema de combustibles fósiles, las manchas solares, que afectan las características hidrológicas de la cuenca. Debido a que las regiones están interconectadas por sistemas hidrológicos, el impacto de la sequía puede extenderse más allá de las fronteras del área con deficiente precipitación (figura 2.14).



Fig. 2.14. Cambios en las frecuencias de inundaciones.



Intensidad y duración de tormentas. Cuando el clima se calienta, se incrementa el agua en el aire, lo que aumenta la capacidad de la atmósfera para retener la humedad. Esto puede afectar severamente en las precipitaciones en ciertas regiones y con intensidades mayores las cuales pueden alterar las frecuencias de las inundaciones.

Actualmente, los modelos de cambio climático no pueden simular con exactitud lluvias de corta duración y de alta intensidad, y los cambios en la media mensual de la lluvia no pueden ser considerados, en principio, como representativos de un cambio en la duración e intensidad de la lluvia. Cabe señalar algunos posibles efectos indirectos del cambio climático sobre la generación de crecidas y la erosión de los suelos. En un escenario de calentamiento global y de aumento de la sequía, cabe esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos en cuencas de pequeño tamaño.

Los daños ocasionados por las inundaciones (figura 2.15) son cada vez más frecuentes y cada vez más intensos, además que los huracanes que cada vez que se presentan dejan destrucción tras su paso. Los daños más importantes son en la agricultura teniendo daños severos en los cultivos hasta pérdidas totales, en cuanto a salud humana hay mayor riesgo de defunciones, lesiones y enfermedades infecciosas y respiratorias. También puede ocasionar alteraciones de los asentamientos, del comercio, del transporte y de las sociedades por efecto de las crecidas.



Fig. 2.15. Inundaciones las áreas en junio 2008 en Cedar Rapids, Iowa.

Calidad del agua. El agua en ríos, acuíferos y lagos contiene muchos materiales disueltos que dependen de las condiciones geológicas y climáticas. Estos materiales definen las características químicas del agua. Las características biológicas son definidas por la flora y la fauna dentro de los cuerpos de agua. La temperatura, carga de sedimentos, y el color son características físicas de la calidad del agua. La contaminación puede ser definida como la alteración de algunos aspectos físicos, químicos o de las características biológicas del agua.



El agua se acidifica y pierde oxígeno, lo que repercute en el desarrollo de la fauna y flora acuática. Por los efectos del calentamiento global y el incremento en la temperatura de los cuerpos de agua se puede presentar mayor cantidad de nitritos o nitratos, lo que significa que ese líquido no se puede consumir.

En México se determinó que cuando la temperatura del agua se incrementó en esos lugares entre 0.72 y 1.38 grados centígrados en los últimos años, implicó efectos drásticos sobre la flora, fauna y potabilidad de la misma. (IMTA 2010).

Los parámetros para definir la calidad del Agua son: Físicos (Turbiedad Color, olor y sabor Salinidad) Microbiológicos (Microorganismos patógenos productores de enfermedades) y Químicos (Sustancias inorgánicas Sustancias orgánicas).

Aunque es inminente que la calidad del agua se verá afectada por el cambio climático, pocos estudios se han dirigido a la modelación de sus impactos potenciales en comparación con aquellos que se han enfocado a flujos y otras variables hidrológicas.

Lo anterior se debe en gran medida, a que generalmente no se cuenta con una base de datos de calidad del agua nutrida, confiable y consistente que pueda ser utilizada para alimentar a los modelos hidrológicos dinámicos. Además la complejidad de la modelación hídrica se incrementa con la inclusión de parámetros de calidad del agua (Whitehead, 2009).

El grupo de expertos de Naciones Unidas sobre el cambio climático afirma que no toda la población mundial se encuentra en la misma situación de riesgo frente a la amenaza del calentamiento del planeta y sus consecuencias, de modo que se han definido una serie de condiciones geográficas y socioeconómicas de alto riesgo para la salud de sus poblaciones:

- Poblaciones que viven en los bordes de las áreas de alta endemicidad de enfermedades sensibles a los cambios del clima, como la malaria o el dengue.
- Regiones en las que se hayan observado brotes epidémicos en relación con fenómenos climáticos extremos como el fenómeno del Niño.
- Áreas con deficientes infraestructuras sanitarias, con problemas medioambientales sobreañadidos o con subdesarrollo económico.
- Regiones muy sensibles a fenómenos climáticos que afecten directamente la salud

Glaciares. Los principales efectos biofísicos consistirían en una reducción del espesor y extensión de los glaciares, mantos de hielo y hielos marinos, y en alteraciones de los ecosistemas naturales, con efectos perjudiciales para numerosos organismos, como las aves migratorias, los mamíferos o los predadores superiores.

Para las comunidades humanas de la región ártica, los impactos, particularmente los resultantes de los cambios la nieve y hielos, serían solo parcialmente buenos.



Algunos de los impactos perjudiciales recaerían sobre las infraestructuras y sobre las formas de vida tradicionales de los pueblos indígenas. En ambas regiones polares, determinados ecosistemas y hábitats se harían vulnerables, al disminuir los obstáculos climáticos a la invasión de especies.

La pérdida parcial de los mantos de hielo en tierras polares y/o la dilatación térmica del agua marina podría ocasionar, a escalas de tiempo muy prolongadas, aumentos de nivel del mar de varios metros, importantes alteraciones de las líneas costeras e inundaciones en extensiones bajas, y sus efectos serían máximos en los deltas pluviales e islas bajas. Los modelos actuales indican que esos cambios tendrían lugar en escalas de tiempo muy prolongadas si subsistiera un aumento de la temperatura mundial de entre 1,9 y 4,6°C. No hay que excluir aumentos rápidos de nivel del mar a escalas de tiempo seculares.



Figura 2.16 Posible disminución de los glaciares debido al cambio climático.

2.3.2 Efectos del cambio climático en diferentes regiones climáticas.

Zonas áridas. Los caudales en estas regiones son muy sensibles a los cambios de las lluvias: un pequeño cambio de disminución en porcentaje de la lluvia, puede ocasionar considerables cambios de reducción en los porcentajes del escurrimiento.

Zonas tropicales.- Son las situadas al norte y al sur de la zona anterior. En ellas predominan los llamados vientos alisios que se forman cuando las masas de aire del norte o del sur se mueven para ocupar el espacio que deja libre el aire ascendente de la zona ecuatorial. Por el efecto Coriolis, en el hemisferio norte los vientos soplan predominantemente de noreste a suroeste, mientras que en el hemisferio sur lo hacen de sudeste a noroeste. Las zonas tropicales situadas entre los 20º y los 40º de latitud, en las que el aire desciende desde la altura, se caracterizan por el predominio de las altas presiones (aire frío y denso que se acumula contra la superficie). Esto supone precipitaciones escasas, normalmente inferiores a los 250 mm anuales, ya que la circulación vertical descendente impide el desarrollo de nubes, pues el aire al bajar aumenta su temperatura y por tanto aumenta su capacidad de contener vapor de agua (mayor humedad de saturación). Por esto en estas zonas hay grandes extensiones desérticas en los continentes, tanto en el hemisferio norte como en el sur. Los cambios climáticos posiblemente afectarían a los caudales, no solo a través de un cambio en la magnitud de las lluvias, sino también a través de cambios en el inicio o duración de los periodos de la lluvia.



Zonas templadas.- Son las situadas al norte (hemisferio norte) o al sur (hemisferio sur) de las zonas tropicales. Justo al norte (o al sur en el hemisferio sur) de donde surgen los vientos, la misma masa de aire que al desplomarse desde la altura ha originado esos vientos, provoca también que parte de ese aire viaje hacia el noreste (o hacia el sureste en el hemisferio sur). En estos lugares los regímenes hidrológicos son dominados por los ciclos de la lluvia y de evaporación y la nieve carece de importancia. Aquí, los cambios climáticos tienden a aumentar la magnitud de los caudales en las diferentes estaciones y generalmente no afecta el tiempo de traslado de los escurrimientos durante el año.

Zonas polares.- En ellas la situación es casi siempre anticiclónica porque las masas de aire frío descienden desde las alturas y se desplazan lateralmente hacia el sur (hacia el norte en el hemisferio sur). En estas zonas llueve muy poco, menos de 250 mm anuales (situación anticiclónica), por lo que se suele hablar de desiertos fríos, a pesar de que se mantengan cubiertos por hielos y nieve. Debido al cambio climático en estas regiones se incrementará el escurrimiento anual debido al deshielo de la nieve en la primavera. Estas áreas están localizadas principalmente en el Norte de América, Europa del Este, casi toda Rusia y el Norte de China y muchos lugares de Asia central.

2.3.3 Efectos del cambio climático en diversos sectores debido a la variación de los recursos hídricos.

Los recursos hídricos están afectados por un gran número de factores así como de diferentes sectores que inciden, o pueden incidir de manera importante, las alteraciones en estos sectores pueden condicionar alteraciones en los recursos hídricos en cantidad y calidad. Todos los sectores que estén relacionados con el suelo y la cobertura vegetal pueden ser de influencia en la generación de escurrimientos, podemos mencionar los más importantes:

Sector forestal. En el país, la tendencia de cambio de los ecosistemas terrestres a otros usos del suelo presenta un problema en los últimos años. La conversión de terrenos forestales hacia otros usos se mantiene como la causa principal del cambio de uso del suelo y de la consecuente deforestación. Los factores que se catalogan como problemas para el manejo forestal son: el aprovechamiento del recurso forestal, los altos costos del manejo forestal sustentable, la tala ilegal, la falta de interés de los productores al manejo sustentable, y su promoción limitada.

Un efecto directo del cambio climático es el potencial aumento de la evapotranspiración, lo que genera estrés hídrico que depende a su vez de la fisiología de cada especie forestal, además pueden presentarse otros factores indirectos como son mayor incidencia de plagas y enfermedades, aumentos en el potencial de incendios forestales y disminución en la polinización, entre otros.

Biodiversidad vegetal. La biodiversidad y los ecosistemas manifiestan síntomas de un impacto antropogénico, que ha sido agudo en el último medio siglo. La deforestación, sobreexplotación y contaminación de los ecosistemas, la introducción de especies invasoras y el cambio climático son causas directas de la pérdida de capital natural (CONABIO 2009).



Esta última causa, coincide con lo mencionado en el Cuarto Informe de Evaluación del PICC (2007), donde se documentan evidencias alrededor del mundo, de los efectos observados estadísticamente significativos en los sistemas naturales, que no se explican con la variabilidad natural sino que se relacionan con el calentamiento global del planeta y que se añaden al impacto directo de pérdida de especies debido al cambio de uso del suelo.

En evaluaciones de impacto y vulnerabilidad ante el cambio climático se debe tomar en cuenta el concepto de grupos funcionales, a nivel de grandes asociaciones de especies. El considerar los efectos del cambio climático especie por especie dificulta la toma de decisiones en materia de conservación y protección, ya que los esfuerzos pueden enfocarse a unas cuantas y no a un conjunto amplio que garantice la conservación del hábitat en un plazo más largo.

A nivel internacional, la aproximación de escenarios de nichos ecológicos (ocupación de especies de un ecosistema) con modelos de distribución de especies ha avanzado hacia la identificación de funciones de distribución de probabilidad, a través del ensamble tanto de escenarios de cambio climático como de escenarios de distribución de nicho. Esto significa un avance en materia de biodiversidad y cambio climático que habrá que explorar.

Edafología. Los cambios en los patrones de precipitaciones y el aumento de las temperaturas medias por el cambio climático también están desempeñando un rol importante en este sentido. Un aumento en la temperatura global acelera las pérdidas de carbono de los suelos, lo que eleva la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Los cambios en los patrones de lluvia contribuyen a un aumento de la erosión en suelos vulnerables, que a menudo ya sufren de bajo contenido de materia orgánica. El cambio climático pondrá más presión sobre la calidad del suelo y aumentará el riesgo de la desertificación y de la degradación de los suelos, esto ya está afectando varias regiones de nuestro país y se espera que se en el futuro cercano estas se intensifiquen.

Ecosistemas terrestres. Los ecosistemas han estado sometidos a intensos cambios climáticos más sin embargo en la actualidad el cambio climático ha acelerado de manera impresionante y esto causa efectos directos e indirectos. Los ecosistemas que se encuentran en su límite ecológico o geográfico son los que se verán más afectados por el cambio climático, debido a la disponibilidad del agua, a la calidad de esta, al incremento de la temperatura y otros factores.

Los principales problemas que se generarán en los ecosistemas terrestres son afecciones en las interacciones de especies, favorecerá la expansión de especies invasoras y plagas, provocará cambios en la estructura y composición de las comunidades y aumentará el impacto de perturbaciones como el fuego. Disminuirá la capacidad de retención de carbono atmosférico de los ecosistemas y se producirán migraciones de especies, así como extinciones locales.

Ecosistemas acuáticos. Los ecosistemas marinos son vulnerables a los impactos del cambio climático, puesto que ya se enfrentan con innumerables presiones, como la pesca excesiva, el desarrollo costero, la contaminación, y la destrucción del hábitat proveniente de la pesca comercial.



Los impactos potenciales del cambio climático y la elevación del nivel del mar en los ecosistemas marinos y costeros son: aumento de la erosión costera, inundaciones costeras más extensas, inundaciones mayores por mar, intrusión del agua de mar en estuarios y acuíferos, temperaturas más altas de la superficie del mar, y reducción de la cubierta del hielo marino. Es probable que estos cambios afecten la composición y la distribución de las especies.

Biodiversidad animal. La gran biodiversidad animal requiere de agua para poder sobrevivir, en el futuro aun hay incertidumbre de cómo se van a comportar las especies ante este y otros cambios. Existen dos escenarios futuros de efectos de cambio climático sobre la biodiversidad animal; el primero de ellos es que los ecosistemas se desplazan en conjunto en función del clima; el segundo es que los ecosistemas se adaptan y cambian. El primer escenario es poco posible debido a la creciente fragmentación del hábitat y a la complejidad de las respuestas de las distintas especies y de sus interacciones. El segundo escenario no permite predicciones exactas en la mayoría de los casos debido a la falta de estudios especializados sobre el área.

Existen evidencias de los efectos directos del cambio climático ocurrido hasta el presente, a pesar de la escasez de buenas series temporales. Así se han detectado importantes cambios fenológicos e poblaciones de vertebrados e invertebrados con adelantos en ciertos procesos de inicio de actividad, llegada de migración o reproducción.

Los desajustes entre predadores y sus presas debidos a respuestas diferenciales al clima son otra consecuencia detectada de recientes cambios.

Sector agrícola. La agricultura depende esencialmente de factores climáticos como la radiación solar, la lluvia y la temperatura, entre otros. más sin embargo el factor más importante para el desarrollo de un cultivo es el agua, el cambio climático afectara la disponibilidad del recurso y por lo tanto afectara de manera directa la producción de algunos cultivos, en especial si no se tiene cuidado en la optimización del recurso.

Otro factor importante es el incremento en la temperatura del medio ambiente, el cual podría intensificar el desarrollo de algunos cultivos, debido a una mayor tasa de acumulación de calor. Lo anterior favorecería la reducción del ciclo fenológico, aunque con un potencial en el decremento de la producción al contar con menos tiempo disponible para absorción de nutrientes, para la intercepción de energía solar y para las actividades metabólicas. (INE 2007).

Sector energético. Las variaciones en la generación de energía eléctrica por medio de las plantas hidroeléctricas van a cambiar en los próximos años ante los impactos del cambio climático, esto por la disminución de los recursos hídricos. Según datos (INE 2007) se estima que la demanda por consumo eléctrico doméstico sería mayor con cambio climático, hacia mediados del presente siglo, debido al incremento en el número de días con temperaturas máximas, que obligará a aumentar la demanda por climatización, inclusive en regiones que actualmente no la utilizan; y al aumento del consumo doméstico en zonas urbanas, debido a la presencia de años calurosos.



El cambio climático puede afectar el desempeño de las instalaciones energéticas, debido a incrementos en la temperatura del aire, del nivel del mar, a variaciones en la intensidad de los vientos, lluvias, humedad relativa y radiación solar; entre otros.

Sector turístico. El sector turístico condiciona un tipo de demanda muy heterogénea en el tiempo. La disminución de recursos y aún más, su peor distribución a lo largo del año será un factor de incidencia en el sector turístico, principalmente para los países que tienen destinos de turismo internacional. Las playas son uno de los principales destinos turísticos, y debido a que los acuíferos de esas zonas pueden presentar intrusión salina así como un incremento del nivel del mar, la contaminación del agua de los acuíferos puede afectar severamente los destinos turísticos.

Salud humana. La situación sanitaria de millones de personas resultaría afectada, ya que agravaría la malnutrición y el número de defunciones, enfermedades y lesiones causadas por fenómenos meteorológicos extremos; aumentaría la carga de enfermedades diarreicas; crecería la frecuencia de enfermedades cardiorrespiratorias debido al aumento de las concentraciones del ozono en niveles bajos de áreas urbanas por efecto del cambio climático; y se alteraría la distribución espacial de ciertas enfermedades infecciosas.

El cambio climático reportaría algunos beneficios en áreas templadas, ya que disminuirían las defunciones por exposición al frío, además de otros efectos parcialmente buenos, como alteraciones del ámbito geográfico. En conjunto, cabría esperar que los beneficios no compensasen los efectos perjudiciales para la salud causados por el aumento de las temperaturas, especialmente en los países en desarrollo.

Industria, asentamientos y sociedad. Las industrias, asentamientos y sociedades más vulnerables son, en términos generales, las situadas en llanuras costeras y planicies propensas a las crecidas fluviales, así como aquellas cuya economía está estrechamente vinculada a recursos sensibles al clima, y otras ubicadas en áreas propensas a fenómenos meteorológicos extremos, especialmente donde los procesos de urbanización son rápidos. Las comunidades pobres podrían ser especialmente vulnerables, en particular las que se concentran en áreas de alto riesgo.

Alimentos. Según las proyecciones, la productividad de los cultivos aumentará ligeramente en latitudes medias a altas para aumentos de la temperatura media de 1 a 3 °C en función del tipo de cultivo, para seguidamente disminuir por debajo de ese nivel en algunas regiones. En latitudes inferiores, especialmente en regiones estacionalmente secas y tropicales, la productividad de los cultivos disminuiría para aumentos de la temperatura local aún menores (de entre 1 y 2 °C), que incrementarían el riesgo de hambre. A nivel mundial, el potencial de producción de alimentos aumentaría, si el promedio local de la temperatura se incrementa entre 1 y 3 °C, aunque por encima de estos niveles disminuiría.

2.3.4 El papel del agua en la economía

De acuerdo con varios economistas, líderes de negocios, científicos y estrategias geopolíticas afirman que el agua será el nuevo petróleo. Para estos expertos, ya no hay que creer que lo



natural es que siempre podamos contar con el agua, esa sustancia que cubre un 70% del planeta y que está presente en un porcentaje similar en el cuerpo humano. Así como a finales del siglo XX hubo un shock del petróleo, el comienzo del siglo XXI puede pasar a la historia por el shock del agua, periodo en que la escasez produciría un aumento de los precios de un recurso que siempre ha sido abundante y de bajo costo. Este escenario podrá tener un impacto de características inimaginables transformando mercados, gobiernos y ecosistemas.

El aumento de la riqueza, por su parte, significa que las personas van a querer consumir más carne, cuya producción requiere un volumen mucho mayor de agua que la producción de verduras. Los aumentos del precio del agua impulsados por la escasez van a exigir cambios profundos de costumbres por parte de agricultores y consumidores.

2.3.5 Agua en la sociedad

El agua es un derecho básico, y no algo que debería ser tratado como propiedad. Negar el derecho al agua es negar el derecho a la vida. Más sin embargo para la mayor parte de la población del mundo, la escasez de agua es, ante todo, una crisis humanitaria. De acuerdo con El Consejo Mundial del Agua, 1,100 millones de personas de todo el mundo no disponen de agua potable en buen estado para consumo o sea, 1/6 de la humanidad. Cerca de 2,600 millones de personas no cuentan con condiciones sanitarias adecuadas. La calidad precaria del agua es una de las principales causas de enfermedades de diarrea y que matan millones todos los años. De acuerdo con un estudio de las Naciones Unidas, 1,6 millones de vidas podrían ser salvadas todos los años si las personas tuvieran agua potable limpia y condiciones sanitarias apropiadas. Hace mucho tiempo que estos problemas se asocian a las infraestructuras deficientes de las naciones subdesarrolladas. Sin embargo, en vista de la previsión de que la población del planeta alcanzará los 9,000 millones en 2050, la idea del agua como sustancia de un elevado valor hace que sean aún más serios los desafíos existentes.

2.3.6 Tecnología y agua

La tecnología de desalación ha mejorado mucho en las últimas tres décadas gracias a la utilización de una técnica conocida como ósmosis inversa, en la que el agua del mar se empuja dentro de una membrana que extrae su sal. Las fábricas de desalación, que desde hace tiempo tienen una importancia crucial en países de Oriente Medio extremadamente secos, como Arabia Saudita, no tuvieron el mismo éxito en otros lugares, ya que la abundancia de petróleo en la región ha permitido el funcionamiento de fábricas que consumen grandes cantidades de energía. Pero ese panorama podría cambiar con los perfeccionamientos introducidos en la tecnología de membrana y de ahorro de energía, que redujeron en EE UU casi un 50% los costos de la desalación. Más sin embargo la conservación y la transformación del agua serán, en general, menos costosos que la desalación debido que la conservación trae siempre beneficios asociados como, por ejemplo, la reducción del costo de la energía.



2.3.7 Efectos de cambio climático en la planificación y el manejo de los recursos hídricos

Para poder realizar una adecuada planificación hidrológica es necesario tener en cuenta dos aspectos fundamentales que son, por una parte, la cuantificación de los recursos hídricos disponibles, especialmente los renovables y, por otra, la estimación de las demandas de los diferentes sectores consumidores de agua, tanto las actuales como las futuras.

El proceso a seguir en la toma de decisiones sobre la asignación de recursos hídricos debe estar claro para todos los interesados directos. La asignación de recursos ha sido a menudo objeto de controversias, que probablemente se agudizarán a medida que aumenten las demandas que compiten por dichos recursos, y que es posible disminuyan debido al cambio climático.

Es indispensable contar con las herramientas adecuadas para la gestión de los recursos hídricos, así como una buena planificación de la infraestructura hidráulica teniendo en cuenta no solo el comportamiento del ciclo hidrológico pasado sino considerando diversos factores de variabilidad climática. La necesidad de planificar a nivel de las cuencas de captación o cuencas hidrológicas, implica integrar la gestión de los recursos hídricos y la conservación de los acuíferos.

Las importantes funciones hidrológicas de las cuencas, incluyendo la recarga de acuíferos, la mejora de la calidad del agua, la amortiguación de las inundaciones, así como el vínculo que existe entre los recursos hídricos están cambiando constantemente, y en el futuro, se espera una mayor variabilidad lo que implica que la infraestructura actual podría ser insuficiente e incluso inadecuada.

Las previsiones en relación con el cambio climático indican que otros desastres naturales, como tormentas e inundaciones, pueden aumentar también tanto en frecuencia como en gravedad, y que estos fenómenos pueden causar daños graves. Por tal motivo es importante empezar a planificar obras y a realizar el manejo integral del agua considerando los posibles efectos, para que en el futuro se tenga una adecuada gestión de los recursos hídricos.

En 1997, The American Water Works Association (1997) publicó algunas recomendaciones para ser tomadas en cuenta por los gestores del agua, algunas de las cuales se muestran a continuación:

-  Los gobiernos de todos los niveles deberían reevaluar las leyes, los procesos técnicos, legales y económicos en el manejo de los recursos hídricos a la luz de un posible cambio climático.
-  Es necesario desarrollar sistemas más efectivos de comunicación entre las organizaciones científicas y las comunidades públicas y de la administración del agua.
-  Los sistemas en el manejo de agua son poco flexibles, la adaptación a nuevas condiciones hidrológicas debería traer costos económicos sustanciales. Las dependencias gestoras del agua deberían empezar a reexaminar los diseños ingenieriles, las reglas de operación, los sistemas de optimización, y los planes de contingencia para los sistemas actuales de manejo de agua que fueron planificados bajo condiciones climáticas pasadas.



- Es necesaria la cooperación de las agencias del agua, para intercambiar información con instituciones científicas y realizar un estado del arte acerca de los impactos del cambio climático en los recursos hidráulicos.

2.3.8 Factores modificables y no modificables de los recursos hídricos.

Los factores modificables y no modificables en los recursos hídricos inciden directamente en la gestión de los recursos (UCLM 2005). Los factores no modificables son la precipitación, la temperatura, el suelo y subsuelo, mismos que tienen la característica de no ser modificables por la acción del hombre y en consecuencia son responsables directos de la variación de las aportaciones en el ciclo hidrológico. Los factores modificables o son las demandas en cantidad y calidad, la estructura temporal de la demanda, los sistemas de recursos hidráulicos y la gestión del sistema. Debido a que es muy difícil hacer cambios en los factores no modificables la única opción que tenemos es tratar de optimizar los recursos para así tener un menor impacto del cambio climático.

En los sistemas de recursos hídricos en especial las reglas de operación de los embalses, pueden ser modificables ya que cambios en los escurrimientos pueden provocar que las reglas que se tienen en el sistema sean inadecuadas e incluso que puedan tenerse problemas mayores como el colapso de la estructura. Por tal motivo será necesario hacer modificaciones en las reglas de operación en los sistemas de recursos hídricos en el futuro.

También podemos incluir otras opciones para los sistemas de recursos hídricos como lo es hacer nueva infraestructura hidráulica para aumentar la capacidad de los embalses o para mejorar la eficiencia en las conducciones o para trasvases de una cuenca a otra o incluso para reutilizar los recursos teniendo en cuenta los cuidados que esto conlleva.

2.3.9 Cambios en las políticas de los sectores debido al cambio climático

La problemática de la disminución de los recursos hídricos afecta un gran número de factores. Todos los sectores tienen una regulación y se basan por medio de leyes y normas para su mejor eficiencia; al reducirse la disponibilidad del agua y afecte dichos sectores obligará hacer cambios en la normativa de dichos sectores.

Política hidráulica. El cambio climático producirá la disminución del agua para México, lo cual implica problemas en el suministro en los diferentes sectores. No hay duda de que al no satisfacerse la demanda de cualquiera de los sectores que dependen del agua, comenzarán los problemas de tipo social, por tal motivo la política hidráulica estará afectada en una manera sin precedentes.

Política científica y tecnológica. El cambio climático sin duda obligará a los países y a sus políticas a impulsar los proyectos que incrementen la eficiencia en el uso del agua, el manejo de la misma, la gestión, la reutilización entre otros. De igual manera se deberá invertir más en investigación tecnológica (desalación del agua) como métodos para combatir la contaminación, el tratamiento del agua y la optimización.



Política agrícola. La política se verá afectada seriamente si disminuyen los recursos hídricos, debido que dentro de las prioridades de abastecimiento siempre serán para abastecimiento urbano, que abastecimiento agrícola. Por tal motivo se debe mejorar bastante el sistema de riego para los cultivos, tratando de incrementar la eficiencia para tener menor pérdida en el sistema. En la política agrícola se contemplará cada vez más la reutilización de aguas principalmente de origen urbano.

Política energética. La política energética, se verá afectada en tres aspectos fundamentales; disminuciones de producción de energía de origen hidráulico inherente a la disminución de recursos, aumento del consumo energético por incremento de las operaciones de desalación y bombeos en trasvases y de agua subterránea para reducir los nuevos déficit hídricos.

Política medioambiental. La política medioambiental se verá afectada teniendo que redefinir los vertidos y sus niveles contaminantes ante posibles reducciones de caudales ecológicos. Al disminuir el recurso e incrementarse la temperatura, la calidad del agua puede disminuir importantemente afectando los caudales ecológicos que tendrán que incrementarse en cantidad y/o calidad para poder establecer los ecosistemas y la vida en los diferentes entornos relacionados con los cuerpos de agua.

2.4 Modelos de circulación general de la atmósfera.

Los modelos numéricos para simular procesos de circulación atmosférica han mejorado notablemente en las últimas décadas. La simulación y el pronóstico del clima han sido objetivos primordiales de los científicos atmosféricos. Los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) se han usado para estudiar la variabilidad y el cambio climático. En ambos casos, una vez conocido el forzante del proceso climático por simular, se utiliza un modelo para comparar la simulación numérica con el forzante impuesto, con aquella generada por el modelo pero sin forzantes.

Para analizar los impactos en el clima del planeta, se usa un modelo de circulación de la atmósfera en el que se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes. Evidentemente, para que un modelo climático sea considerado útil para usarse como herramienta de análisis debe poder simular, al menos aproximadamente, el ciclo anual promedio del clima.

Esencialmente un modelo climático, está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Estas ecuaciones expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático que son: la conservación del momento, de masa, la ecuación de estado de los gases, la conservación de la energía y la conservación de vapor de agua, respectivamente (Sordo C 2006). Actualmente, los MCG incluyen además modelos de funcionamiento de los océanos denominados modelos de circulación general acoplados océano atmósfera (MCGAO-A).



Para el estudio del cambio climático se realiza un manejo de los forzantes radiativos, efectuándose simulaciones numéricas en donde se aumentan gradualmente las concentraciones de gases de efecto invernadero. Dependiendo de qué tipo de aumento en estos gases se proponga, será la respuesta en el clima que se obtenga. La mayoría de los modelos del clima sugieren que a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor será la magnitud de la anomalía climática. No existe un experimento climático único para analizar el cambio climático, pues depende de cómo se piensa que serán las emisiones. Una buena descripción de qué son los modelos de circulación del clima aparece en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) del Grupo I del PICC. En ella se analizan los elementos de los modelos que, por su complejidad y también por su importancia en el clima, requieren consideración especial.

Para que las predicciones de algún modelo sean consideradas, éstas deben incluir algunas características observadas hasta ahora del calentamiento global. Idealmente se esperaría que un modelo describiera los siguientes parámetros:

-  La temperatura de superficie ha aumentado y continuará aumentando, más rápidamente sobre el continente que sobre los océanos.
-  La troposfera baja también se ha estado calentando, aunque a un menor ritmo que la superficie.
-  La amplitud del ciclo diurno de la temperatura ha disminuido al aumentar las temperaturas mínimas por el aumento en la nubosidad y la precipitación.
-  Los glaciares se han retraído, y la cubierta de hielo y nieve disminuido.
-  El calor en el océano ha aumentado.
-  Hay más vapor de agua en la atmósfera que resulta en más precipitación, como en el Hemisferio Norte.
-  Algunas partes del Hemisferio Sur no parecen estar calentándose.
-  No hay tendencias en la extensión de la cubierta de hielo y nieve en la Antártida.
-  Las variaciones observadas en la intensidad y frecuencia de los ciclones extra tropicales no muestran una tendencia significativa.

No todos los modelos simulan adecuadamente todos los puntos antes mencionados, pero se puede pensar que las proyecciones que se obtienen de ellos deben tomarse seriamente, principalmente las variaciones de muy baja frecuencia y las tendencias del clima pronosticadas.

Se dispone de simulaciones de cambio climático confiables, al menos en escalas espaciales subcontinentales y a escalas temporales de una estación a décadas. Sin embargo, aún es difícil obtener conclusiones sobre el cambio climático en escalas espaciales regionales o locales. El grado de respuesta del sistema climático a un cambio definido en alguno de los factores que lo determinan es la sensibilidad climática. Mediante experimentos climáticos suficientemente prolongados se puede calcular el incremento de la temperatura media global que se obtiene al variar instantáneamente las concentraciones de CO₂, permitiendo que el sistema llegue, luego, a un nuevo estado de equilibrio. En los modelos de clima actuales se consideran de forma explícita



los procesos atmosféricos y oceánicos, así como sus principales interacciones. Esto se debe a que el océano desempeña un papel crucial en el clima de la Tierra y su variabilidad.

Los MCGAO-A se basan en la resolución del conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física y que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano, por tal motivo es un sistema complejo no lineal de ecuaciones diferenciales que no tienen solución analítica. Todas estas ecuaciones se resuelven a través de métodos numéricos en el cual se divide el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdas tridimensionales en las cuales se asignan valores a las diferentes variables que caracterizan el estado físico de la atmósfera y el océano.

Para observar las evoluciones temporales de las variables en cada celda de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos de tiempo cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdas. Cuanto menor sea dicho tamaño, también ha de serlo el tiempo de simulación. La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGAO-A actuales varía entre 2º y 10º de latitud y longitud en la horizontal (entre 220 km y 1100 km) y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesores variables, mientras que las resoluciones horizontales y verticales de la parte oceánica suelen ser similares o algo superiores a las atmosféricas.

En escalas temporales de unos pocos decenios, el ritmo de calentamiento que se observa actualmente puede utilizarse para limitar la respuesta proyectada para un determinado escenario de emisiones, a pesar de la incertidumbre en cuanto a la sensibilidad del clima. El análisis de modelos simples y la comparación de las respuestas de los MCGAO-A en escenarios de forzamiento hipotéticos sugieren que en la mayoría de los escenarios, en los próximos decenios, es probable que los errores en las proyecciones a gran escala de las temperaturas aumenten en forma proporcional a la magnitud de la respuesta general. La magnitud estimada de los ritmos de calentamiento atribuibles a la influencia humana que se observan actualmente y la incertidumbre que los rodea permiten por lo tanto estimar, con relativa independencia de los modelos, el grado de incertidumbre de las proyecciones que abarcan varios decenios y respecto de la mayoría de los escenarios. Si se tienen en cuenta las observaciones recientes, es probable que el calentamiento antropógeno oscile entre 0,1 y 0,2°C por decenio durante los próximos decenios (IPCC 2000).

2.4.1 Definición de Escenario.

Un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras, basada en un cierto número de suposiciones y en la actual comprensión científica de nuestro sistema climático. Sirven para exponer el conjunto de la información actualmente disponible sobre la posible evolución del clima, para poder aplicarla a las evaluaciones de impacto del cambio climático. Los escenarios pueden representar una variable o un conjunto de variables como la precipitación, temperatura, población mundial actividad industrial, emisiones de CO₂, nivel medio del mar entre otros. La mayoría de los escenarios son construidos en base a la evolución de las tendencias climáticas pasadas.



2.4.2 Tipos de escenarios para estudios de cambio climático.

El estudio del cambio climático involucra demasiadas variables, por consecuencia, se deben plantear múltiples escenarios para tratar de representar la evolución del clima, de las características del suelo, de la población, de la sociedad y la economía.

1.- Escenarios socioeconómicos.

Al examinar vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, puede ser tentador enfocarse sólo en cómo el cambio climático podría afectar a la sociedad y a la naturaleza. Principalmente estos escenarios se utilizan para observar el cambio en las emisiones de CO₂, basándose en incrementos de la población, cambios en la tecnología, valores sociales, entre otros.

Tomando las condiciones sociales y naturales de hoy, e imponiendo un cambio climático futuro puede ser una manera relativamente sencilla del actuar para identificar vulnerabilidades y analizar las adaptaciones. Durante este tiempo, es razonable esperar que las condiciones socioeconómicas y naturales cambien, en ocasiones dramáticamente. Como resultado de estos cambios, la vulnerabilidad al cambio climático y la eficacia de las adaptaciones también podrían cambiar.

2.- Escenarios de cambio de uso en la tierra.

El cambio de uso de suelo y cambio en la cobertura vegetal comprende varios procesos que son fundamentales para la estimación del cambio climático y sus impactos. Estos escenarios influyen en los flujos de carbono y las emisiones de los GEI, que alteran directamente la composición atmosférica. Toman en cuenta las características de la superficie terrestre debida a una posible conversión de la cobertura vegetal que pudieran alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático. Se han construido una gran diversidad de este tipo de escenarios, la mayoría, sin embargo, no tratan explícitamente cuestiones de cambio climático, sino que centran su atención en otras cuestiones, por ejemplo, la seguridad alimentaria y el ciclo del carbono (IPCC 2001).

3.-Escenarios ambientales.

Los escenarios ambientales tratan todo lo relacionado con los factores ambientales que pueden cambiar en un futuro. Los escenarios deben mostrar las posibles condiciones ambientales futuras como la evolución del dióxido de carbono y otros componentes en la atmosfera y el cambio en la disponibilidad del agua, en calidad como en cantidad.

4.-Escenarios de incremento en el nivel del mar.

Estos escenarios son creados principalmente debido al incremento en la temperaturas de de los océanos, principalmente en las zonas donde cubiertas por hielo. Al incrementarse la temperatura, los glaciares se derriten, incrementando así el nivel del mar. Los escenarios tratan de estimar cuantos metros se incrementaría para los próximos años y que poblaciones se verían afectadas en caso de que esto sucediera. Recientemente, algunos estudios han comenzado a expresar la futura



subida del nivel del mar en términos probabilísticos, lo que facilita la evaluación de la subida del nivel en términos del riesgo de exceder un umbral crítico del impacto.

5.-Escenarios de emisión del IPCC

Los escenarios del IPCC SRES (Special Reports on Emission Scenarios) están dirigidos por varias fuerzas motivadores sobre el cambio climático, incluyendo crecimiento de la población y desarrollo socio-económico. Estas fuerzas motivadoras generan varios escenarios futuros que pueden tener una influencia en las fuentes y sumideros de gases invernadero, como los sistemas de energía y el cambio en el uso de la tierra. La evolución de estas fuerzas motivadoras en relación al cambio climático es incierta. Esto resulta en un amplio rango de posibles caminos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los incrementos futuros de las temperaturas y cambios de las precipitaciones son las principales estimaciones. Los escenarios de emisiones desarrollados por el IPCC han sido dos: los escenarios IS92 desarrollados en 1992 (IPCC 1994) y los escenarios de emisiones SRES/ IE-EE publicados en el 2001 (IPCC 2002).

6.-Escenarios IS92 del IPCC

En 1992, el IPCC publicó unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar unos escenarios sobre el cambio climático. Los denominados escenarios IS92 constituyeron un gran paso adelante. Eran los primeros escenarios mundiales que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero. Desde entonces, nuestros conocimientos sobre las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y sobre el cambio climático han cambiado considerablemente. En la tabla 2.2 se muestra el resumen para los escenarios IS92, donde el escenario IS92e es el que presenta las consecuencias ambientales más severas. Generalmente se considera al escenario IS92a como el escenario medio y el que mayormente es utilizado para estudios de cambio climático.

Estimación de escenarios	1990	escenarios IS92 para el 2100					
		IS92a	IS92b	IS92c	IS92d	IS92e	IS92f
Población (billones)	5.3	11.3	11.3	6.4	6.4	11.3	17.6
Crecimiento económico	-	2.3	2.3	1.2	2.0	3.0	2.3
Concentración de CO ₂ (ppm)	354	708	685	471	542	954	820
Cambio en la temperatura media anual	-	2.2	2.1	1.5	1.8	2.6	2.5
Rango (°C)	-	1.50-3.14	1.46-3.06	1.29-2.18	1.18-2.56	1.83-3.73	1.74-3.59
Incremento del nivel medio del mar (cm)	-	51	50	40	45	57	56
Rango de incremento del nivel medio del mar (cm)	-	20-90	20-89	14-76	16-82	24-98	23-96



Tabla 2.2 Resumen de los escenarios IS92 y sus consecuencias ambientales estimadas. Fuente <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/is92/index.html>.

7.-Escenarios SRES/IE-EE del IPCC

Los escenarios del SRES/IE-EE abarcan una gran diversidad de las principales fuerzas determinantes de las emisiones futuras, desde la demografía hasta la evolución tecnológica y económica. Ninguno de los escenarios del conjunto contiene políticas futuras que aborden explícitamente el cambio climático, aunque todos los escenarios abarcan necesariamente diversas políticas de otros tipos. El conjunto de escenarios de emisiones del IE-EE está basado en una extensa evaluación de las publicaciones al respecto, más seis metodologías de modelación alternativas y un proceso abierto que recabó una amplia participación e información en reciprocidad de numerosos grupos y personas. Los escenarios del IE-EE abarcan el intervalo de valores de emisiones de todas las especies pertinentes de gases de efecto invernadero (GEI) y de azufre, más las fuerzas determinantes de éstos.

Estos escenarios presentan cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 B2) y para cada línea evolutiva, se han desarrollado varios escenarios distintos basados en diferentes planteamientos de los modelos (figura 2.17), con objeto de examinar todos los posibles resultados que se obtendrían de una serie de modelos basados en unos supuestos similares sobre los factores determinantes. Se utilizaron seis modelos, representativos de marcos de evaluación integrados aparecidos en las publicaciones. Una de las ventajas de basarse en una multiplicidad de modelos estriba en que los 40 escenarios IE-EE resultantes abarcan, en su conjunto, todos los valores de incertidumbre actuales de las emisiones de GEI que se derivan de diferentes características de dichos modelos, además de los conocimientos actuales sobre (y de las incertidumbres a que dan lugar) las fuerzas determinantes de los escenarios, como, por ejemplo, los cambios o tendencias demográficas, sociales o económicos, o los grandes cambios tecnológicos que determinan los modelos, según se describe en las líneas evolutivas. En trece de esos 40 escenarios se exploran distintas variaciones de los supuestos relativos a las tecnologías de la energía.

Dentro de cada familia, se han desarrollado dos clases principales de escenarios: unos, basados en supuestos armonizados sobre la población mundial, el crecimiento económico y el uso final de la energía, y otros basados en una cuantificación alternativa de la línea evolutiva. En conjunto, se han armonizado 26 escenarios mediante la adopción de unos supuestos comunes sobre la población mundial y sobre el desarrollo del producto interior bruto (PIB). Así pues, los escenarios armonizados de cada familia no son independientes entre sí. En los 14 escenarios restantes se han adoptado interpretaciones alternativas de las cuatro líneas evolutivas, con objeto de explorar las incertidumbres adicionales con independencia de los planteamientos metodológicos de los distintos escenarios. Dichos escenarios están también relacionados entre sí dentro de cada familia, aun cuando no compartan supuestos comunes con respecto a algunas fuerzas determinantes.

Las principales características de las líneas evolutivas se mencionan a continuación. En el año 2100 el mundo habrá experimentado cambios que resulta difícil imaginar: tan difícil como lo habría sido concebir, a finales del siglo XIX, los cambios acaecidos en los 100 años subsiguientes. Cada línea



evolutiva está basada en una dirección de los acontecimientos futuros claramente diferenciada, de tal manera que las cuatro líneas evolutivas difieren con un grado de irreversibilidad creciente. En su conjunto, describen futuros divergentes que cubren una parte considerable de las incertidumbres inherentes a las principales fuerzas determinantes. Abarcan una gran diversidad de características “futuras” decisivas, como el cambio demográfico, el desarrollo económico o el cambio tecnológico. Por esa razón, su plausibilidad o su viabilidad no deberían considerarse solamente en base a una extrapolación de las tendencias económicas, tecnológicas y sociales actuales.

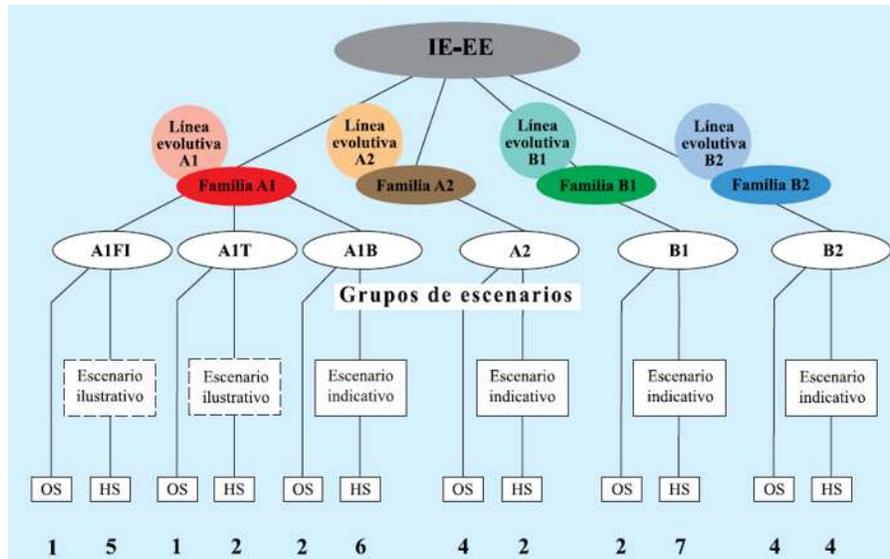


Figura 2.17. Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios.

Fuente: IPCC 2000.

La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada (todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.) de todo tipo de fuentes (A1B).

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se



obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

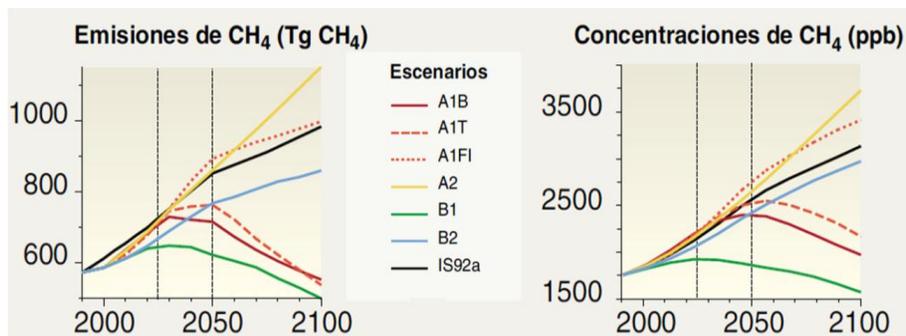


Figura.2.18 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de CH₄ para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

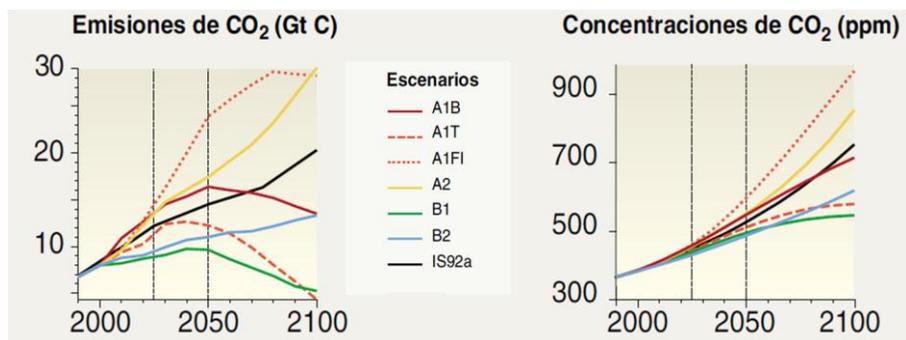


Figura.2.19 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de CO₂ para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC 2000.



En las figuras 2.18 a 2.21 podemos observar las emisiones y las concentraciones de los principales de efecto de gas invernadero que se utilizan como forzantes para la modelación del clima para los años 1990-2100. Los escenarios más críticos, es decir donde se presentará el mayor cambio climático son el A2 y el A1T, en el rango intermedio de cambio climático se presentan los escenarios A1B, IS92, finalmente los escenarios que presentan la menor cantidad de forzantes son el B1 y el B2.

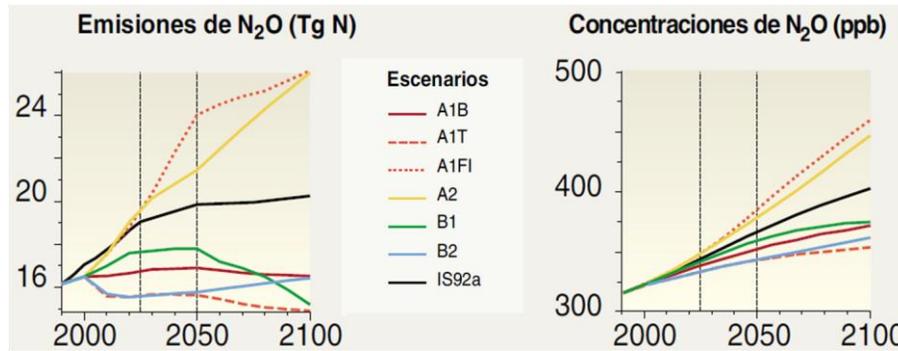


Figura 2.20 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de N₂O para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

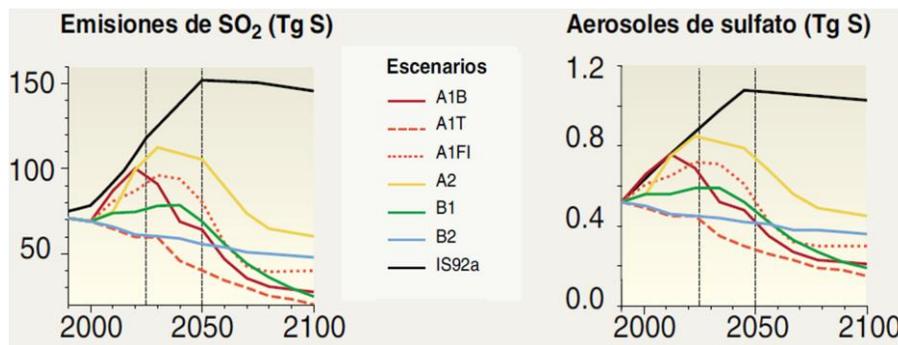


Figura.2.21. Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de SO₂ para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

Los escenarios de emisiones de los GEI se basan en una población mundial para realizar las modelaciones del cambio en la temperatura y la precipitación como podemos observar en las figuras 2.18 a 2.21 las mayores concentraciones se dan en las familias que tienen desarrollos más lentos y una mayor población, en La figura 2.22 se muestra la población mundial en billones para los diferentes escenarios de cambio climático.

Existen diferencias importantes entre los escenarios IS92 y SRES en cuanto a las proyecciones de temperatura como se puede ver en la tabla 2.3 el mayor incremento de la temperatura es de 2.64 °C para el escenario IS92e con un posible rango entre 1.83 °C y 3.73 °C. En lo correspondiente a los escenarios SRES las mayores estimaciones se tienen en el escenario A1F1 en donde el incremento óptimo de la temperatura es de 4 °C con una variación entre 2.4 °C y 6.4 °C.

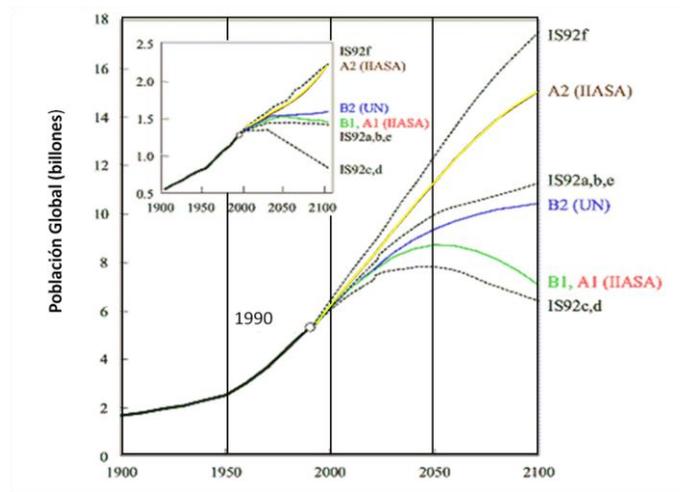


Figura.2.22. Población mundial considerada en las emisiones de los GEI para los escenarios IS92 y SRES/IE-EE. Fuente IPCC 2000.

Escenario	Incremento en la temperatura (°C)	
	estimación óptima	intervalo más probable
COMMIT	0.6	0.3-0.9
B1	1.8	1.1-2.9
A1T	2.4	1.4 - 3.8
B2	2.4	1.4 - 3.8
A1B	2.8	1.7 - 4.4
A2	3.4	2.0 - 5.4
A1F1	4.0	2.4 - 6.4

Tabla 2.3 Incremento en la temperatura para los diferentes escenarios climáticos para finales de siglo (2090-2099). Fuente IPCC 2000.

En cuanto a las emisiones de dióxido de carbono los escenarios IS92 el valor máximo proyectado es de 820 ppm, mientras que para los escenarios SRES es de alrededor de 950 ppm correspondientes a la familia del escenario A1F1, por lo tanto podemos concluir que las proyecciones estimadas por los escenarios SRES es mayor que la de los escenarios IS92.

2.4.3 Escenarios climáticos.

En las evaluaciones de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos se utilizan diferentes metodologías para la definición de escenarios climáticos entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- **Escenarios sintéticos.** Son cambios que se hacen al periodo histórico del clima de referencia en donde se hacen aumentos o disminución de variables para ver el comportamiento del sistema e incluso para ver que tan sensibles son los modelos ante esas variables. Ejemplos claros son incrementar la temperatura 1% a 5% y disminución en



las precipitaciones entre el 5% y el 15%. Pueden tener base en algunos de los resultados de los MCGAO-A a escala global.

- **Escenarios basados en analogías climáticas.** Son la representación de un clima en base a similitudes con otras regiones geográficas, como por ejemplo similar precipitación media anual, temperatura del área en estudio, entre otras. Estas analogías sirven para tener una idea más clara de cómo pueden ser los resultados en el área de estudio.
- **Escenarios obtenidos a partir de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmosfera (MCGAO-A).** En la actualidad son los de mayor difusión y los de mayor uso, así como en los que se tiene un mayor sustento científico además de presentar una gama de escenarios los cuales se basan en periodos de tiempo observado del clima a nivel regional y global.

Los escenarios presentados por el IPCC representan cambios en los valores medios del clima; más sin embargo algunos escenarios recientes han incorporado cambios en la variabilidad y en los sucesos climáticos extremos que pueden tener importantes impactos y pérdidas económicas y de vidas humanas.

2.4.4 Proyecciones de los cambios futuros en la temperatura en base a los MCGAO-A

Los MCGAO-A proyectan cambios de las temperaturas en función de una serie de variables climáticas a gran escala, a medida que cambia el forzamiento radiativo del sistema climático. Los MCGAO-A proyectan que el aumento de la temperatura del aire en la superficie en el Atlántico norte y en las regiones circumpolares del Océano Antártico, será inferior al promedio mundial. Además, proyectan que habrá una menor variación de la temperatura diurna en muchas regiones, y que la temperatura mínima durante la noche subirá más que la temperatura máxima durante el día.

Todos los modelos presentan una retracción de los hielos marinos tanto en el ártico como en el antártico en todos los escenarios IEEE. En ciertas proyecciones, el hielo marino ártico del final del verano desaparece casi completamente hacia el final del siglo XXI.

Es muy probable que aumente la frecuencia de los valores extremos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas así como un aumento de la temperatura superficial de los mares tropicales.

Para fines del siglo XXI (2070 a 2100), el cambio de la temperatura media del aire en la superficie mundial, será de 3,0°C como promedio (con un margen de variación de entre 1,3 y 4,5°C) en el escenario de referencia preliminar A2, y de 2,2°C (con un margen de variación de entre 0,9 y 3,4°C) en el escenario de referencia preliminar B2. En el escenario B2 se produce un calentamiento más leve, acorde con su menor ritmo de aumento de la concentración de CO₂.

En escalas temporales de unos pocos decenios, el ritmo de calentamiento que se observa actualmente puede utilizarse para limitar la respuesta proyectada para un determinado escenario de emisiones, a pesar de la incertidumbre en cuanto a la sensibilidad del clima. El análisis de



modelos simples y la comparación de las respuestas de los MCGAO-A en escenarios de forzamiento hipotéticos, sugieren que en la mayoría de los escenarios, en los próximos decenios, es probable que los errores en las proyecciones a gran escala de las temperaturas, aumenten en forma proporcional a la magnitud de la respuesta general. La magnitud estimada de los ritmos de calentamiento atribuibles a la influencia humana que se observan actualmente y la incertidumbre que los rodea, permiten por lo tanto estimar, con relativa independencia de los modelos, el grado de incertidumbre de las proyecciones que abarcan varios decenios y respecto de la mayoría de los escenarios.

Es muy probable que en casi toda la superficie terrestre, el calentamiento sea más rápido que el promedio mundial, sobre todo en las altas latitudes del hemisferio norte durante la estación fría. Los resultados de las últimas simulaciones de MCGAO-A forzadas con escenarios de emisiones A2 y B2 del IE-EE indican que, en el invierno, el calentamiento en todas las regiones septentrionales de latitudes altas supera en más de un 40% el índice medio de calentamiento mundial en cada uno de los modelos (que es de 1,3 a 6,3°C en toda la gama de modelos y escenarios considerados). En verano, el calentamiento supera en más de un 40% la variación media mundial en el centro y el norte de Asia. Solamente en el sur de Asia y en la región meridional de América del Sur durante los meses de junio, julio y agosto, y en Asia sudoriental en ambas estaciones, los modelos coinciden en señalar un calentamiento inferior al promedio mundial.

Se proyecta que la temperatura media de la superficie mundial aumentará entre 1 y 6°C (Figuras 2.23 y 2.24) en el período comprendido entre 2000 y 2100. Estos resultados, obtenidos con varios modelos climáticos, corresponden a los 35 escenarios del IE-EE sin excepción. Se proyecta que los aumentos de temperatura serán mayores que los seis escenarios IS92, que oscilaban aproximadamente entre 1,0 y 3,5°C. El valor más alto y el margen de variación más amplio de las temperaturas proyectadas se deben principalmente al menor nivel de las emisiones de SO₂ previsto en los escenarios del IE-EE, en comparación con los escenarios IS92. El ritmo de calentamiento proyectado es muy superior a los cambios observados durante el siglo XX y es muy probable que alcance valores sin precedentes si se le compara como mínimo con los últimos 10.000 años, de acuerdo con los datos paleoclimáticos.

La clasificación entre los escenarios SRES en lo que se refiere a la temperatura media mundial varía con el tiempo. En particular, en los escenarios que prevén un uso más intenso de combustibles de origen fósil (y por ende mayores emisiones de dióxido de carbono, como el escenario A2), las emisiones de SO₂ también registran valores más altos. En el corto plazo (hasta el año 2050 aproximadamente), el efecto de enfriamiento de las emisiones más abundantes de dióxido de azufre disminuirá considerablemente el calentamiento causado por el aumento de las emisiones de GEI en escenarios como el A2. El efecto contrario se advierte en los escenarios B1 y B2, en que las emisiones de combustibles de origen fósil y de SO₂ son menores y dan lugar a un mayor calentamiento en el corto plazo. Sin embargo, a más largo plazo, el nivel de las emisiones de GEI con un período de vida más prolongado, como el CO₂ y el N₂O, se convierten en las principales fuerzas determinantes de los cambios climáticos resultantes.

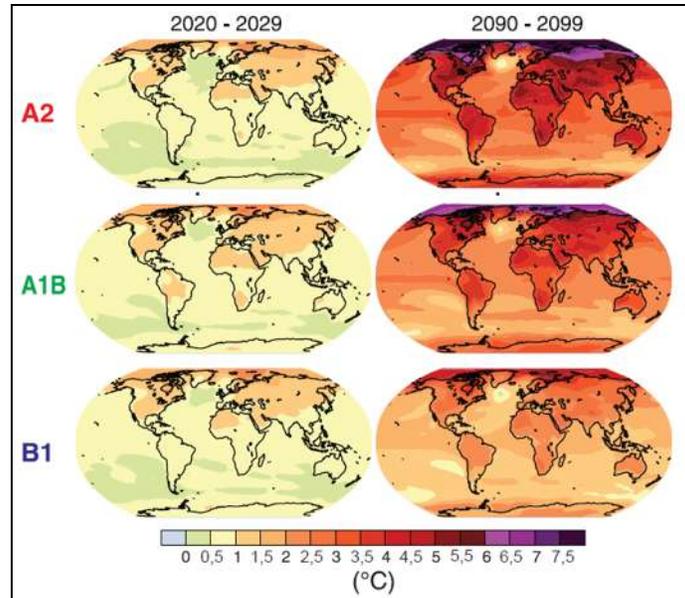


Figura. 2.23. Proyecciones del cambio de la temperatura en superficie para el comienzo y el final del siglo XXI. En los mapas aparecen representadas las proyecciones del promedio de los MCGAO-A para los escenarios SRES A2 (parte superior), A1B (parte central) y B1 (parte inferior) a lo largo de los decenios 2020-2029 (izquierda) y 2090-2099 (derecha). IPCC 2007.

Para el año 2100, las diferencias en las emisiones previstas en los escenarios SRES y las distintas respuestas de los modelos climáticos añaden una incertidumbre similar al margen de variación de la temperatura mundial. Surgen además otras dudas debido a la incertidumbre que existe en el forzamiento radiativo. La mayor incertidumbre en lo que se refiere a los forzamientos es la que se deriva de los aerosoles de sulfatos.

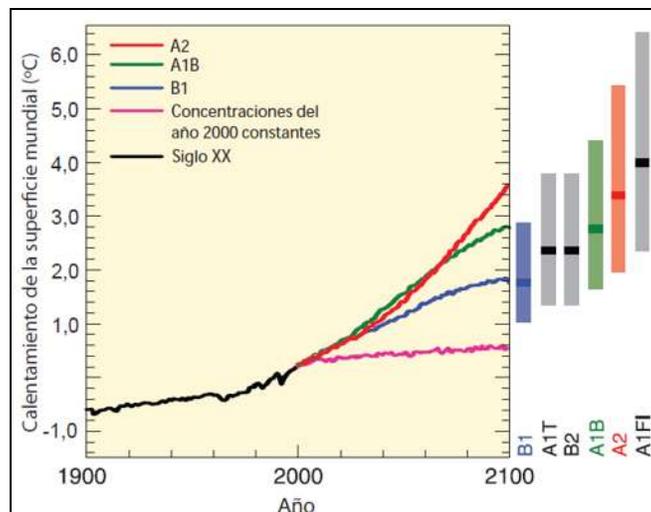


Figura.2.24 Promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios IEEE A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. IPCC 2007



2.4.4.1 Proyecciones de los cambios en la precipitación a partir de los MCGAO-A.

De manera general los diferentes escenarios proyectan que habrá un aumento de los promedios mundiales de vapor de agua, evaporación y precipitaciones. A escala regional se observan tanto aumentos como disminuciones. Los resultados de simulaciones realizadas recientemente con MCGAO-A, forzadas con escenarios de emisiones A2 y B2 del IE-EE, indican una probabilidad de aumento de las precipitaciones tanto en verano como en invierno en las latitudes altas. Durante el invierno también se observan aumentos en las latitudes medias del hemisferio norte, en las zonas tropicales de África y en la Antártida, y durante el verano en el sur y el este de Asia. En Australia, América Central y el África meridional se registra una disminución constante de las lluvias durante el invierno.

De acuerdo con las tendencias observadas en un número reducido de estudios realizados con MCGAO-A actuales y MCG más antiguos, y de estudios de regionalización, existe una estrecha correlación entre la variabilidad interanual de las precipitaciones y el promedio de las precipitaciones. Es probable que si el promedio de las precipitaciones aumenta en el futuro, también aumente la variabilidad. A la inversa, es probable que la variabilidad de las precipitaciones disminuya únicamente en las zonas en las que descienda el promedio de las precipitaciones.

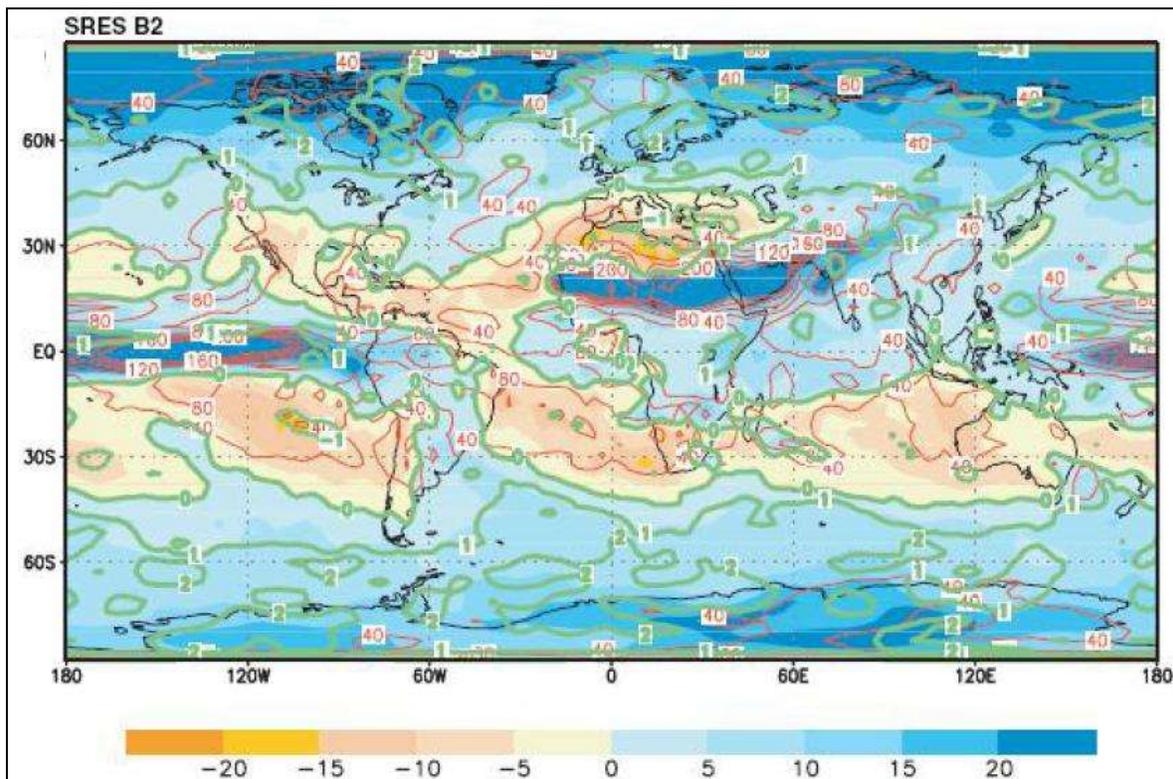


Figura 2.25 Resultados de los MCGAO-A del cambio anual medio de la precipitación (%) y su margen de variación (isolíneas en rojo) en el escenario SRES/IE-EE B2, para el periodo 2070-2100 con respecto al periodo de 1961-1990 (IPCC 2001).

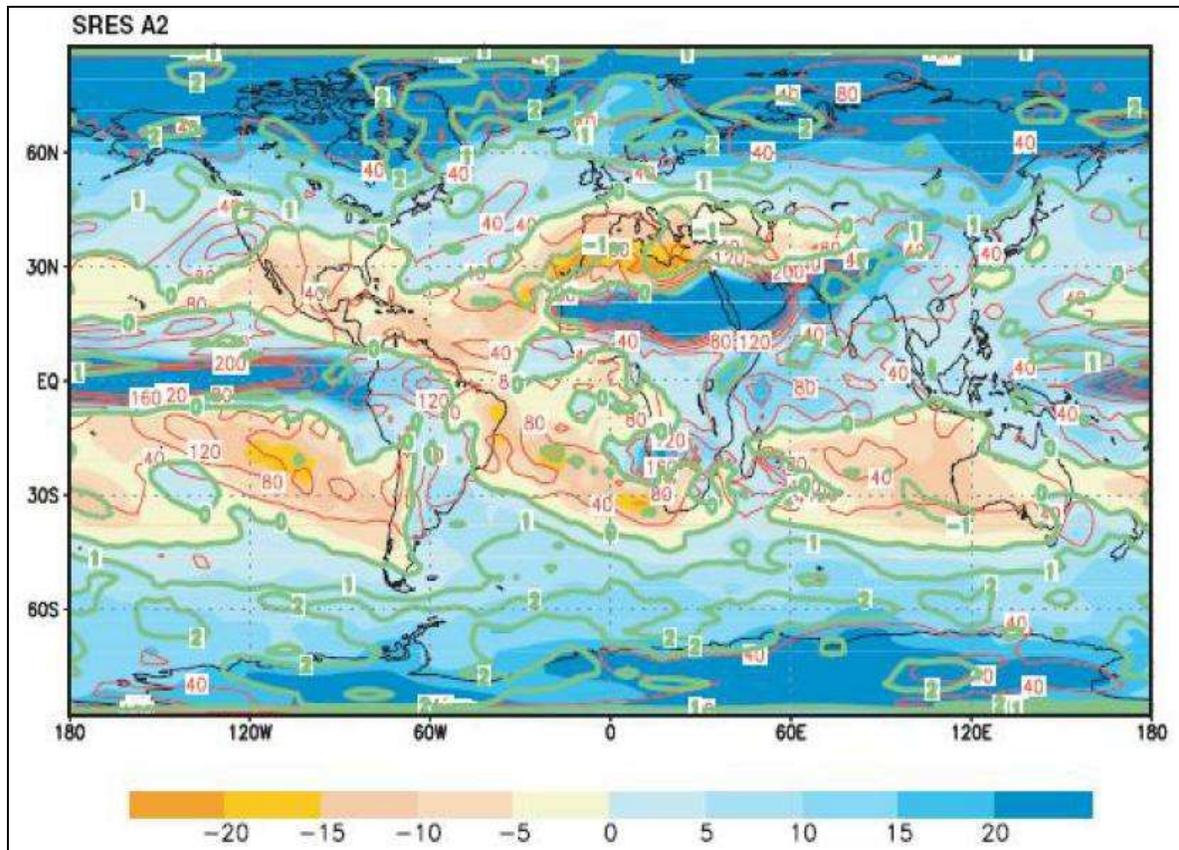


Figura 2.26 Resultados de los MCGAO-A del cambio anual medio de la precipitación (%) y su margen de variación (isolíneas en rojo) en el escenario SRES/IE-EE A2, para el periodo 2070-2100 con respecto al periodo de 1961-1990 (IPCC 2001).

En las figuras 2.25 y 2.26 se pueden hacer algunas observaciones importantes en cuanto a las precipitaciones para México donde presentan una disminución entre el 5 y el 10% en el periodo 2070-2100 para en escenario B2 y de un 10 a un 15% para el escenario A2, en ambos casos se presenta una variabilidad del 40% entre los resultados de los diferentes modelos MCGAO-A.

Al incrementarse las temperaturas y al disminuir las precipitaciones para México, se verá afectado el ciclo hidrológico siendo los escurrimientos uno de parámetros principalmente afectados, el IPCC muestra en la figura 2.27 que los escurrimientos se reducirán aproximadamente entre un -2 y -40% para México, lo cual implica menor disponibilidad del agua para los sistemas de recursos hídricos.

Es importante mencionar que los MCGAO-A tienen un grado de incertidumbre para países como México e incluso algunos modelos proporcionan resultados incoherentes en algunas zonas, por tal motivo es importante el desarrollo de software especializado para estas latitudes. Por tales motivos es necesario el análisis de los resultados de los diferentes MCGAO-A observando la correlación que presenta cada uno de ellos para la modelación del clima actual.

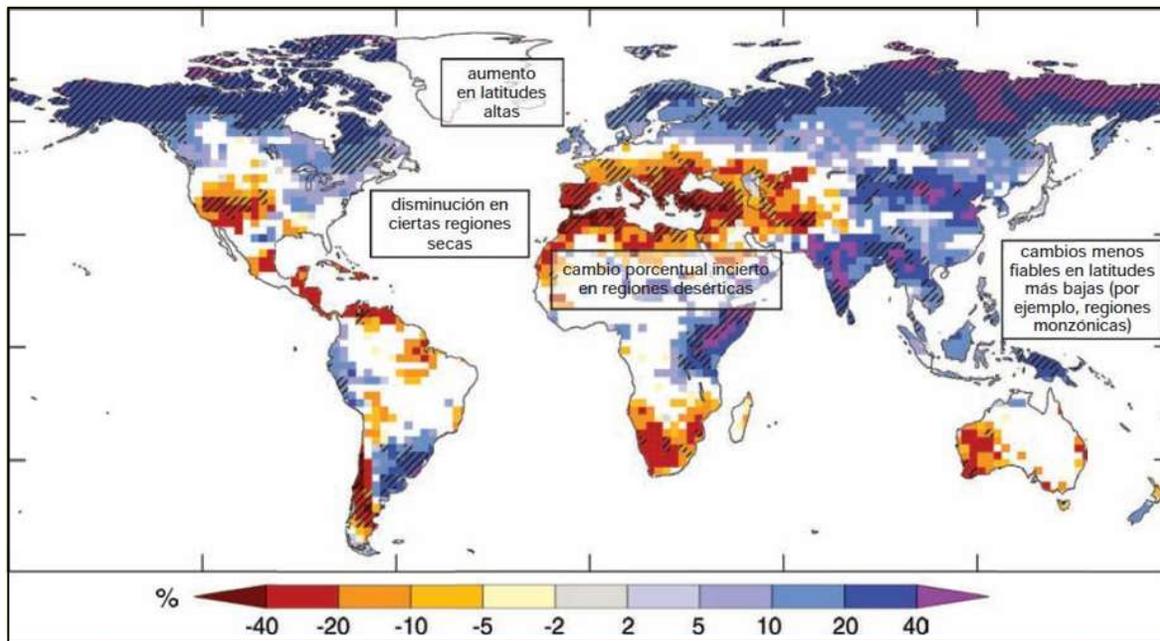


Figura. 2.27. Cambios relativos en el escurrimiento anual en gran escala (disponibilidad de agua, en valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999. Los valores representan la mediana de 12 modelos climáticos para el escenario A1B (IEEE). Las áreas en blanco denotan los lugares en que menos de un 66% de los doce modelos concuerdan en el signo del cambio, y las áreas estriadas, los lugares en que más de un 90% de los modelos coinciden en el signo del cambio. (Fuente IPCC 2001).

2.4.4.2 Principales MCGAO-A Modelos de Circulación General Atmosfera Océano Atmosfera.

En la actualidad hay un gran número de modelos para predecir el clima más sin embargo todos presentan variaciones en cuanto a los datos que predicen, principalmente nos interesan los modelos que predicen la temperatura y la precipitación. Los modelos más conocidos son los presentados en el cuarto reporte del cambio climático por el IPCC los cuales tienen una gran difusión y se utilizan para su regionalización a través de otros modelos matemáticos. Los modelos más usados reúnen las características de la figura 2.28.

No todos los países cuentan con las características requeridas de los modelos que se analizan en el presente ya que se requiere de una gran coordinación de los gobiernos con institutos y los expertos en el tema; de hecho según INE (2007) solamente 10 países en todo el mundo han desarrollado software para proyección de las variables climáticas (figura 2.29). Es importante mencionar que la ubicación de cada país es importante para el desarrollo de los MCGAO-A, esto debido a que cada país tiene diferentes condiciones climáticas, por lo tanto algunas de las hipótesis de los modelos cambian, así como las consideraciones y simplificaciones que realizan cada uno de los expertos. Por ejemplo no son las mismas condiciones climáticas de China como las características de Canadá y por lo tanto, cada modelo tendrán resultados diferentes e incluso incongruentes en algunas zonas o países del mundo.

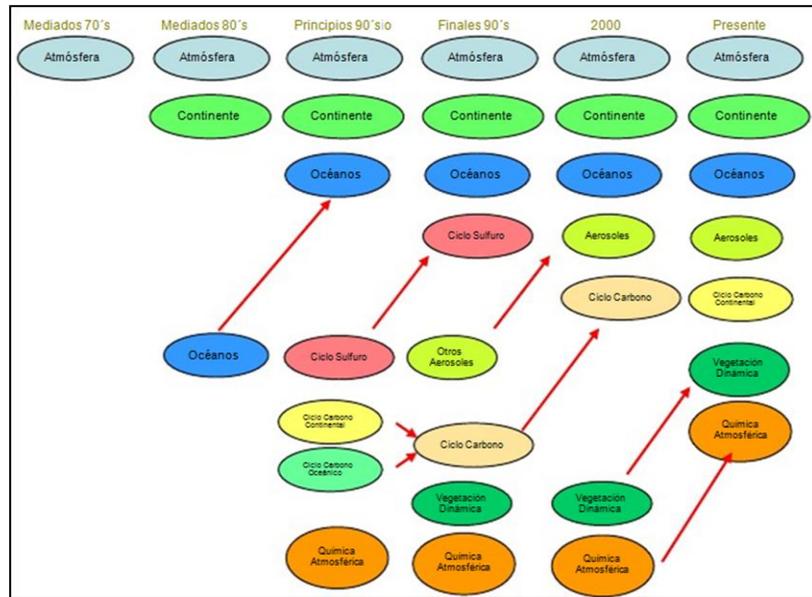


Figura. 2.28 Evolución de los elementos considerados en los modelos del clima. Fuente IPCC 2001

Para elegir el modelo o modelos se debe tomar en cuenta que los resultados cumplan las características básicas de un MCGAO-A (visto al inicio del capítulo 2.4) y de esta manera podamos elegir el modelo o modelos que mejores resultados presenten para el área de estudio. En la tabla 2.4 se presentan los modelos generales de circulación que presentaron resultados después del 1 de septiembre de 2006 en el archivo de datos del IPCC.

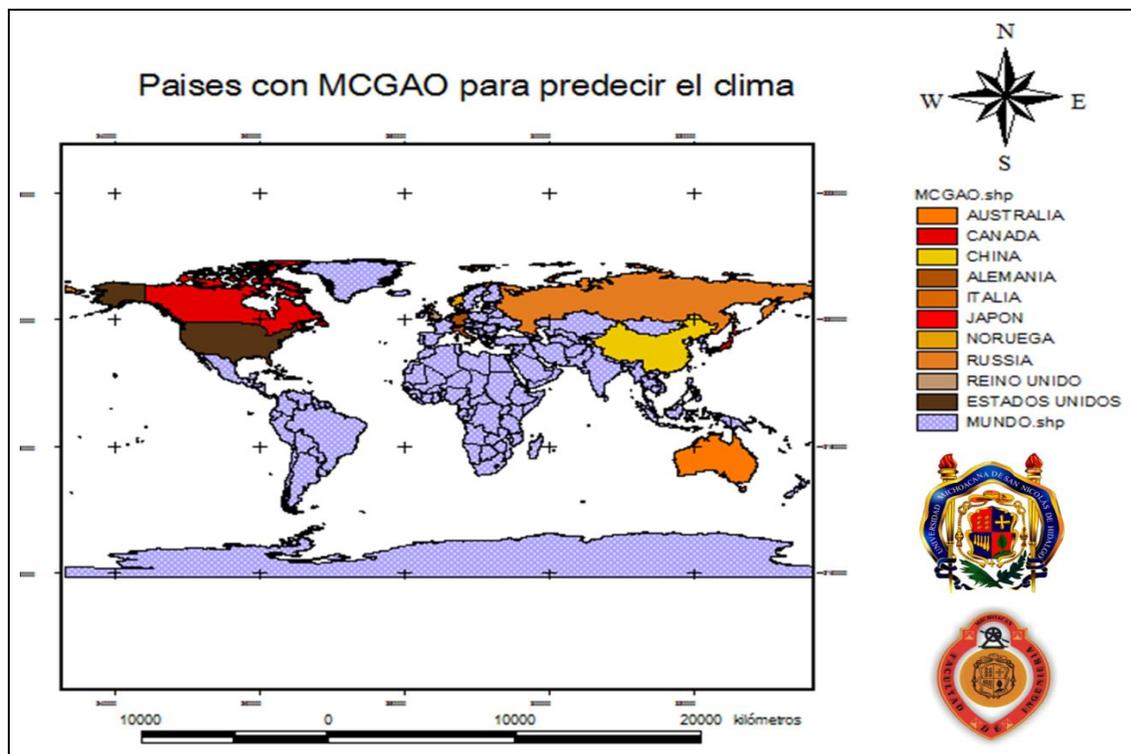


Figura. 2.29 Países que cuentan con MCGAO-A para analizar el clima actual y futuro.



Los modelos de circulación general utilizados son:

Modelo	Agencia de desarrollo, país y página en internet
ensamble	
bccr_bcm2_0	Bjerknes Centre for Climate Research Norway http://www.bjerknes.uib.no/
cccma_cgcm3_1	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis Canadá http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/
cccma_cgcm3_1_t63	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis Canadá http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/
cnrm_cm3	Centre National de Recherches Meteorologiques France http://www.cnrm.meteo.fr/
csiro_mk3_0	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Australia http://www.csiro.au/
csiro_mk3_5	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Australia http://www.csiro.au/
gfdl_cm2_0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA http://gfdl.noaa.gov/
gfdl_cm2_1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA http://gfdl.noaa.gov/
giss_model_e_h	Goddard Institute for Space Studies USA http://aom.giss.nasa.gov/
giss_model_e_r	Goddard Institute for Space Studies USA http://aom.giss.nasa.gov/
giss_aom	Goddard Institute for Space Studies USA http://aom.giss.nasa.gov/
iap_fgoals1_0_g	Institute of Atmospheric Physics



	China http://www.lasg.ac.cn/english/
ingv_echam4	National Institute of Geophysics and Volcanology Italy http://www.ecmwf.int/research/demeter/general/docmodel/ingv.html
inmcm3_0	Institute for Numerical Mathematics Russia http://www.inm.ras.ru/
ipsl_cm4	Institut Pierre Simon Laplace France http://www.ipsl.fr/en/content/view/full/886
miroc3_2_hires	National Institute for Environmental Studies Japan http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml
miroc3_2_medres	National Institute for Environmental Studies Japan http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml
miub_echo_g	Meteorological Institute, University of Bonn Germany http://www.meteo.uni-bonn.de/
mpi_echam5	Max-Planck-Institut for Meteorology Germany http://www.mpimet.mpg.de/
mri_cgcm2_3_2a	
ncar_ccsm3_0	National Centre for Atmospheric Research USA http://www.cgd.ucar.edu/
ncar_pcm1	National Centre for Atmospheric Research USA http://www.cgd.ucar.edu/
ukmo_hadcm3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/
ukmo_hadgem1	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/

Tabla 2.4 MCGAO-A existentes para la modelación del clima actual y futuro. Fuente INE 2007.



2.4.4.3 Escenarios de cambio climático a partir de los modelos climáticos regionales.

México es un país altamente vulnerable a variaciones en el clima; los impactos negativos de sequías o inundaciones, aun siendo parte de la variabilidad natural del clima, se convierten con frecuencia en desastre. Sin embargo, aun es común escuchar que los desastres, mal llamados naturales, son impredecibles y cada vez más frecuentes debido a que “la naturaleza fue impredecible o se puso en nuestra contra”. Recurrir a este paradigma naturalista lleva a que la sociedad juegue un papel pasivo ante un elemento activo como el clima. Las implicaciones de esta visión, hacen que estado y sociedad no asuman las responsabilidades inherentes a toda organización en materia de seguridad, al no reconocer la influencia de los procesos sociales, económicos y políticos en la construcción de la vulnerabilidad.

Por los motivos antes mencionados se tiene la necesidad de estimar los potenciales impactos del cambio climático y se requiere de conocer con mayor detalle espacial cómo cambiará el clima. Para ello, es necesario pasar de los ensambles producidos por MCGAO-A, a ensambles de mayor resolución espacial, que reflejen las características y tendencias del clima regional. Esto ha llevado a algunos a suponer que es conveniente utilizar aquel modelo que mejor simule el clima actual en dominios de interés particular. Este no es un planteamiento adecuado, pues los experimentos de cambio climático fueron pensados en simular la respuesta global y de gran escala ante incrementos en las concentraciones de GEI y no para simular el clima de un lugar en particular. Es por ello que la calidad de los escenarios, se evalúa considerando la capacidad del modelo de responder al forzante radiativo observado en el siglo XX y comparando con los cambios de temperatura promedio global que han venido ocurriendo desde entonces. Sin embargo, algunos estudios recientes sugieren que aun cuando el MCGAO-A responda adecuadamente al forzante radiativo relacionado con cambios en los GEI del siglo XX, no hay garantía de que se tengan escenarios adecuados (Reifen y Tuomi, 2009). No resulta fácil por tanto, establecer cuál es el mejor o peor modelo para cambio climático por lo que la estrategia a seguir, dada la naturaleza caótica del sistema climático, es trabajar por medio de ensambles multimodelo (Richardson, 2000).

En lo concerniente al cambio climático y adaptación, es muy importante generar escenarios regionales para analizar con mayor detalle los impactos potenciales que éste tendrá. El regionalizar las salidas de un MCGAO-A no es sólo un proceso de interpolación, sino que requiere de saber qué se gana y qué se pierde cuando se presentan versiones de alta resolución espacial de un MCGAO-A. Por ello, uno de los grandes retos en el estudio del cambio climático a través de modelos es analizar fenómenos de mesoescala que tienen un fuerte impacto en parámetros meteorológicos y en cantidades derivadas, como la disponibilidad de agua o los rendimientos agrícolas.

El clima a escala regional, está determinado en gran medida por la topografía y el uso de suelo, que son en gran medida responsables de la dinámica atmosférica de mesoescala. Cambios en el uso de suelo por ejemplo, pueden generar cambios locales del clima, al modificarse el albedo, la rugosidad y la humedad del terreno. Así, la deforestación tenderá a aumentar la cantidad de



energía reflejada en la superficie afectando el balance de energía local. Al mismo tiempo, la rugosidad se verá afectada al igual que la humedad en el suelo y con ello el ciclo hidrológico. Un claro ejemplo de cómo el cambio en el uso de suelo afecta el clima local, es la urbanización explosiva, la cual tiende a generar el fenómeno conocido como Isla de Calor. No se piense sin embargo que el cambio de uso de suelo lleva solo a aumentos de temperatura o disminución en las lluvias. En realidad, dichas alteraciones en el ambiente pueden tener efectos de retroalimentación positivos y negativos. Por ello, la presentación de escenarios regionales de menos de 10 km X 10km de resolución a partir de un clima base bajo consideraciones puramente topográficas, más un cambio de temperatura o lluvia dado por un MCGAO-A de baja resolución (Hijmans *et al.*, 2005) resulta una aproximación poco sólida al verdadero problema de proyectar el clima futuro a escala regional. Basta pensar, en cuántos procesos de pequeña escala no quedan considerados y resultan en fuentes de incertidumbre, como son las circulaciones de mesoescala del tipo brisas de valle montaña o brisas de mar. A escalas de 1 km X 1 km la incertidumbre en los escenarios de cambio climático es tan grande que se pierde con respecto de la señal. En el caso de México la distancia media entre estaciones climáticas es de alrededor de 50 km.

Es de especial relevancia en el análisis del cambio climático contar con una aproximación de ensamble multimodelo, pues el cálculo de la probabilidad o la confianza que se tenga en una proyección puede ser cuantificado.

La creación de los escenarios de cambio climático, es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático, pues de ellos depende la dirección de los impactos estimada. Los escenarios regionales constituyen puentes entre los encargados de los MCGAO-A y los responsables de construir estrategias de adaptación. Por lo tanto tales escenarios deben brindar información relevante para los sectores o a la medida de las necesidades del usuario, suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto. La información debe ser representativa del rango de cambio y de incertidumbre de las proyecciones, incorporando las características de la región y diseñada para alimentar esquemas de toma de decisiones. Esto puede hacer la diferencia entre la implementación de un nuevo modelo de desarrollo sustentable con un manejo de recursos adecuado, y continuar con las tendencias de desarrollo actuales, que han puesto en riesgo a diversas regiones y sectores ante un clima cambiante. En la práctica sin embargo, es difícil poder reunir todas esas características en un escenario, pues requiere de desarrollo de capacidades entre los encargados de generar información climática y los usuarios.

Los escenarios de cambio climático regional, se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (*downscaling*) estadísticas o dinámicas. En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local (*predictandos*) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general (*predictores*). Esta técnica ha cobrado gran importancia por permitir utilizar las salidas de los MCGAO-A como las del IPCC-AR4 para establecer escenarios probabilísticos. La opción dinámica para la reducción de escala son los Modelos de Clima Regional (RCM por sus siglas en inglés). Estos modelos son similares a los modelos de clima global pero de mayor resolución espacial y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos como la topografía o el uso de suelo



dentro del dominio de interés. Dependiendo de la resolución del modelo, se puede también resolver explícitamente algunos de los procesos que son parametrizados en los MCGAO-A. Dicha opción requiere de capacidades científicas y técnicas para poder representar los escenarios en forma probabilística, por lo que la mayoría de los experimentos en esta línea se enfocan al análisis de procesos.

Existe así, una gran variedad de herramientas de reducción de escala de las salidas de los MCGAO-A, tanto dinámicas como estadísticas, que en su mayoría son gratis. MM5, PRECIS, RegCM3 y SDSM son algunos de los más populares. MM5, PRECIS y RegCM3 son de tipo dinámico, SDSM es de tipo estadístico. Los desarrollos dinámicos existentes para escenarios regionales más actualizados son del tipo del proyecto PRUDENCE en Europa, o NARCCAP para Norte América. Por el lado estadístico, el Statistical Downscaling Method (SDSM) (Wilby et al., 2002) es una de las herramientas de escalamiento espacial más utilizadas en la proyección local, pues su esquema de reducción de escala se basa en la regresión lineal múltiple a un punto, ocupando campos precipitación, temperatura, radiación, globales del MCGAO-A y locales observados cuenta además con un generador estocástico de tiempo meteorológico que permite simular el clima bajo cambio climático. Existe otra herramienta de regionalización de salidas de MCGAO-A de tipo estadística, conocida como CPT, desarrollada por el International Institute for Climate and Society (IRI). El CPT es una herramienta de regionalización de pronósticos estacionales basada en la corrección de errores sistemáticos en las salidas de los modelos a través de identificar patrones espaciales. El CPT tiene algunas limitaciones, como el hecho de que fue desarrollado para uso de pronósticos estacionales a escalas mensuales. Más sin embargo el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM ha implementado una versión para que CPT procese gran cantidad de datos que permitan reducir de escala todos los modelos ofrecidos en el IPCC-AR4. Los datos disponibles en el IPCC son de escala mensual por lo que para estimar la actividad de eventos extremos diarios, se requiere de escalamiento temporal, con esquemas del tipo de Generadores Estocásticos de Tiempo Meteorológico (GETM). Los GETM más populares en la comunidad de cambio climático han sido *LARS* y *WGEN* (Semenov *et al.*, 1998 y Wilks *et al.*, 1999).

La resolución espacial típica de los MCGAO-A (300 km X 300 km) no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo, ciclo hidrológico). Algunas veces, los impactos de las variaciones del clima global cobran características especiales muy particulares en regiones de topografía marcada, en islas o en regiones de contrastes en el uso de suelo, factores que generan circulaciones de mesoescala. La reducción de escala espacial de salidas de MCGAO-A debe incorporar elementos que resultan en circulaciones de mesoescala y/o clima local en las proyecciones de cambios atmosféricos, entregando así un valor agregado a las salidas directas de los MCGAO-A. Es claro que mucho de ese valor agregado, dependerá del entendimiento de los procesos que generan clima local o regional y de la disponibilidad de datos para poderlo representar.

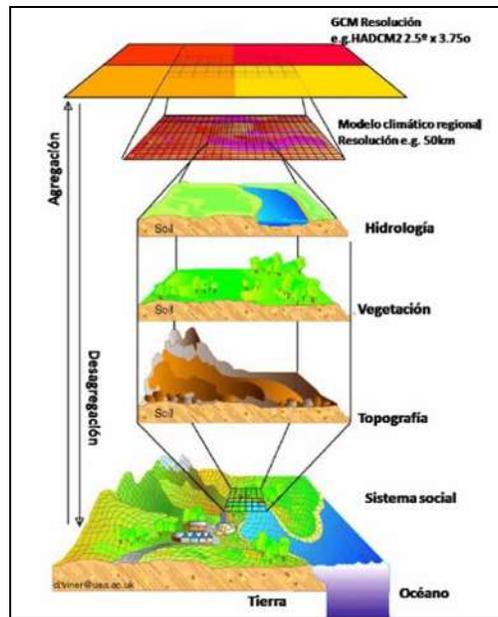


Figura 2.30 Esquema General de escalamiento espacial.

La base de la reducción de escala estadística es que existen relaciones entre el clima local y el de gran escala (dinámicas o estadísticas), que permiten determinar condiciones locales a partir de información de baja resolución, y que estas relaciones permanecen válidas aun bajo condiciones climáticas futuras (figura 2.30). Las técnicas estadísticas de reducción de escala se refieren a métodos en los que los cambios regionales o locales, correspondientes a procesos de menor tamaño que la resolución espacial del MCGAO-A, son calculados como función del clima de gran escala y pueden ser clasificados en forma general en tres categorías:

- Funciones de transferencia, que son relaciones estadísticas entre los valores de condición de gran escala en un punto de altura o superficie y las condiciones del clima en un sitio específico. Un ejemplo de esta aproximación es el esquema SDSM.
- Relaciones entre patrones de circulación y clima local, construidas a partir de clasificación de patrones de circulación y sus relaciones con condiciones particulares de tiempo en un punto o región. La identificación de patrones se realiza por Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs, por sus siglas en inglés), por ejemplo en el esquema CPT.
- Generadores estocásticos de tiempo, que son modelos estadísticos que pueden estar regulados por las condiciones de gran escala al momento de producir condiciones de tiempo local. Un ejemplo de esta aproximación lo constituye el esquema LARS.

2.4.4.4 La Herramienta de Predicción del Clima (CPT) para la reducción de escala

El CPT es un esquema de escalamiento estadístico desarrollado por el IRI, con el objeto de proveer una herramienta de fácil uso en pronósticos regionales estacionales. El CPT, es una aplicación computacional, diseñado específicamente como corrector de errores sistemáticos a salidas de MCGAO-A mediante la técnica conocida como Model Output Statistics (MOS) (Glahn, H. R., y D. A.



Lowry, 1972), estableciendo relaciones entre patrones espaciales de un campo independiente y otro de respuesta.

El esquema CPT permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR) y análisis de correlación canónica (CCA). CPT cuenta con la aplicación de diferentes técnicas estadísticas como: estandarizar los campos de los MCGAO-A, muestrear los datos, re-calibrar las ecuaciones en un segundo periodo, normalizar los campos, sustituir valores faltantes o aplicar diferentes técnicas para derivar las EOFs, todo ello con el objeto de optimizar las ecuaciones de reducción de escala (Funciones de Transferencia). CPT trabaja con campos mensuales o estacionales obtenidos de un periodo histórico de simulación del MCGAO-A (periodo de calibración), y tiene la capacidad de construir una ecuación de transferencia para cada mes.

El esquema CPT establece las funciones de transferencia del campo de alta resolución al de baja resolución para cada mes. El primer modo de variabilidad de los datos, corresponde al ciclo anual. Antes de calcular las EOFs, los datos son muestreados bajo condiciones extremas, previniendo que las funciones de transferencia obtenidas sean inestables en el tiempo. Las ecuaciones de regresión se construyen con un periodo de calibración y otro de validación cruzada, que en la práctica consiste en probar la función de transferencia original en una muestra de datos independiente. Así, la base de datos del control se divide en subconjuntos. Con el primero se calibra la Función de Transferencia, mientras que con el otro subconjunto (muestra independiente) se confirma y valida el análisis original. En el caso de PCR, el esquema construye tantos modelos estadísticos como EOFs puedan ser calculados en la variable independiente (los datos del modelo). Los EOFs pueden ser calculados de diferentes maneras, ya sea utilizando la matriz de covarianza, correlación o por mínimos cuadrados. Una vez calculados, se construye un modelo de regresión optimizando el número de EOFs utilizados evaluando el desempeño que tuvo cada combinación de EOFs en explicar las características del campo observado en periodo de validación cruzada.

A través de ecuaciones de regresión en las que CPT arregla los modos reproducidos por modelos de tal forma que expliquen la mayor varianza del campo de alta resolución. Sus cuatro modos permiten obtener los cambios adecuados para la proyección. El primer modo contiene el comportamiento histórico por lo tanto, la tendencia, que es la componente base de los escenarios de cambio climático y los otros tres modos son los que determinan las anomalías estacionales. Para evaluar las proyecciones de los MCGAO-A de cambio climático es más importante capturar la componente de tendencia del primer modo, que las siguientes componentes, ya que en ésta se evalúa la sensibilidad del sistema climático ante el forzante radiativo (INE 2007).

Cumplidos los criterios para considerar confiables las salidas de los MCGAO-A para estudios de cambio climático en México y por tanto, su regionalización, se puede aplicar el esquema CPT modificado. La regionalización se hace para cada variable de manera independiente mes a mes. Se construyen los modelos de regresión (funciones de transferencia) entre la simulación del MCGAO-A y el campo observado (de alta resolución espacial) en el periodo conocido como de calibración



(1901-1969). Los 30 años restantes (1970-1999) se conservan para validación, es decir como muestra independiente.

Cuando se considera el ensamble de la anomalía de temperatura media anual simulada por 19 modelos en el periodo de muestra independiente para un punto, el conjunto refleja la tendencia observada dentro del rango desplegado por el conjunto de todas las simulaciones. La mejor simulación no la provee un modelo en particular, sino el promedio y la dispersión de todos. Por tanto, se mantiene el mayor número de proyecciones.

Una vez analizados los modelos CPT para cada MCGAO-A y mes, la regionalización se extiende a proyecciones bajo los escenarios de emisiones SRES A2, SRES A1B, SRES B1 y COMMIT (emisiones constantes del 2000). La comparación entre la resolución típica del MCGAO-A, de aproximadamente $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, y la nueva resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, construida con cada MCGAO-A regionalizado con CPT muestra claramente el avance para simular los patrones regionales del clima. El CPT imprime todos los modos de variabilidad de mayor resolución espacial contenidos en los datos observados para el periodo de calibración, surgiendo en forma más clara las características de mesoescala relacionadas con la orografía.

2.4.4.5 Escenarios de cambio climático para México mediante modelos regionales de clima.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para pronosticar el clima en escalas estacionales o anuales, o para generar escenarios de cambio climático. Uno de los de mayor importancia en materia de modelación numérica del clima, ha sido el reconocer que las predicciones o proyecciones del clima sólo pueden darse en un sentido probabilístico que refleje la naturaleza caótica del sistema climático. Por ello, un pronóstico del clima se debe construir con varios experimentos numéricos que parten de condiciones iniciales ligeramente diferentes. El conjunto de todos los experimentos constituye un ensamble, que permite estimar a la condición más probable. La dispersión entre esos experimentos nos habla de la confianza o incertidumbre del pronóstico y se puede expresar como una Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Así, la información de pronóstico incluye no sólo el valor medio, sino también una media de la dispersión entre los experimentos numéricos o realizaciones que forman el ensamble. Si la dispersión es baja, se tiene mayor confianza de que se llegará a una condición climática dada. Si la dispersión es alta, existe mayor incertidumbre en cuál será el estado más probable y por tanto se habla de que el clima para ese periodo o región es poco predecible. La medida de cuán predecible es el clima se puede obtener a través de experimentos con modelos MCGAO-A numéricos y determinando la dispersión entre los experimentos de los ensambles. Si recurrentemente se tiene alta dispersión entre miembros del ensamble se habla de que el clima tiene baja predecibilidad en esa región. Por el contrario, baja dispersión corresponde a una alta predecibilidad.

2.4.4.6 Escenarios mediante el modelo regional de clima CPT

Según el Instituto Nacional de Ecología (INE 2007), el estudio de escenarios de cambio climático regionales utilizando CPT permite generara gran cantidad de experimentos en relativamente poco



tiempo, utilizando campos medios mensuales. Esta técnica de generación de escenarios de cambio climático regionales tiene por ello ventajas y desventajas, podemos mencionar las siguientes:

Ventajas:

- Es computacionalmente económica y por ello permite hacer gran número de regionalizaciones.
- Permite la estimación de incertidumbre, medida a través de la dispersión entre regionalizaciones.
- Dependiendo de la escala espacial del campo observado de referencia (0.5° X 0.5°) se pueden realizar regionalizaciones a la medida de las necesidades del usuario.
- Se puede implementar para prácticamente cualquier variable climática.
- Es relativamente fácil visualizar los campos y tendencias para el periodo del experimento del MCGAO-A.
- Se pueden realizar evaluaciones del modelo comparando con la tendencia de los últimos veinte o treinta años a escala regional considerando la incertidumbre asociada a las diferencias entre modelos,
- Se puede analizar el plazo para el cual se desea el escenario de cambio climático regional,

Desventajas:

- Parte de la hipótesis de que las relaciones de las variables en los campos de baja resolución a alta resolución no cambian.
- Se debe considerar los errores de reducción de escala en el esquema CPT.
- No permite análisis de eventos extremos de manera directa porque no construye campos diarios.
- Requiere de un generador de tiempo estocástico para estimar cambios en la actividad de eventos hidrometeorológicos extremos.
- Requiere preparar los campos de los experimentos de MCGAO-A (AR4-IPCC) para insertar a CPT.

Uno de los objetivos del modelo regional de clima CPT es generar los campos atmosféricos (escenarios climáticos) necesarios para realizar estudios sobre los efectos del cambio climáticos en diversas áreas, como pueden ser los recursos hídricos o cualquier otra área específica, debido a que proporciona cambios mensuales en la precipitación y la temperatura.

México es un país que cuenta con escenarios regionalizados mediante el programa CPT los cuales están disponibles en la página del INE <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/> y donde se reduce la escala a los resultados de los MCGAO-A proporcionados por el IPCC-AR4; se tienen disponibles los siguientes escenarios.

- Escenario A1B se cuenta con 24 modelos para el periodo 1900-2100.
- Escenario A2 se cuenta con 19 modelos para el periodo 2000-2100.



- Para el escenario B1 se cuenta con 20 modelos para el periodo 2000-2100.
- Para el escenario de compromisos de reducción de emisiones (COMMITTED) se cuenta con 17 modelos para 2000-2100.

2.4.4.7 Escenarios Ensamble para México.

La proyección de escenarios de alta resolución espacial se puede hacer utilizando como datos de entrada las salidas de los modelos de circulación general. En cada caso el INE (2007) ha construido un modelo CPT mediante regresión de componentes principales. Las variables a analizar son la temperatura media y la precipitación.

Si se usan diversos modelos como información inicial hay diferencias que generan incertidumbre respecto a la magnitud y ubicación de las anomalías de temperatura. Casi en todos los modelos las proyecciones de incremento en temperatura son mayores hacia la zona noroeste del país, los incrementos más pequeños de temperatura proyectados generalmente ocurren en la zona noreste y centro de México. Los escenarios reflejan en buen medida las tendencias que se han venido observando en México durante los últimos cincuenta años.

La lista de modelos disponibles incluye varios modelos que con frecuencia no contemplan todos los escenarios de emisiones o todas las variables utilizadas, por lo tanto no todos los MCGAO-A se utilizaron para crear el ensamble. Los campos originales se compararon con los reducidos de escala espacial para confirmar que el esquema CPT no introducía cambios radicales en los patrones de aumento de temperatura del MCGAO-A en su escala espacial original.

Los escenarios deben en general presentarse como ensambles que describan tanto los primeros como los segundos momentos estadísticos de la distribución. Así, para un mismo escenario de emisiones se pueden tener diferentes magnitudes en las proyecciones de calentamiento que lleven a incertidumbre asociada a los modelos. La segunda fuente de incertidumbre está asociada a los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero utilizados.

Para el ensamble se promedian diez de los escenarios generados que tienen un mejor comportamiento y se estima la dispersión entre ellos como una medida de la incertidumbre. De esta manera, se puede tener una idea del rango de incremento en temperatura a escala regional (50km X 50km) para la República Mexicana.

2.4.4.8 Escenario ensamble de temperatura regionalizado (CPT).

El calentamiento global para finales del siglo XXI muestra en general, éste será mayor en el hemisferio norte que en latitudes medias y altas. Analizando las salidas de los modelos de baja resolución (MCGAO-A), las proyecciones para México bajo los escenarios SRES de emisiones de GEI, se encuentra un incremento de temperatura superficial del mismo modo que con el patrón global, hacia latitudes más altas y sobre regiones continentales. Prácticamente todas las realizaciones indican un cambio positivo.



Para el escenario o línea evolutiva A2, en el periodo de tiempo 2010-2039, los cambios en la mayor parte de de México son alrededor de 0.5 a 1°C con una dispersión de 0.5°C. Entre los años 2040-2069 el aumento promedio proyectado entre modelos está entre 2 y 2.5°C, con mayores aumentos hacia el norte de México. La dispersión entre proyecciones es de 0.75°C (rango intercuartil), es decir la dispersión sobre México es relativamente pequeña comparada con el valor del cambio. Finalmente, hacia finales del presente siglo, entre el 2070 y el 2099, los aumentos llegan a ser de entre 2.5 y 3.7°C en el norte de México, con una dispersión entre proyecciones de hasta 1.25°C (figura 2.31).

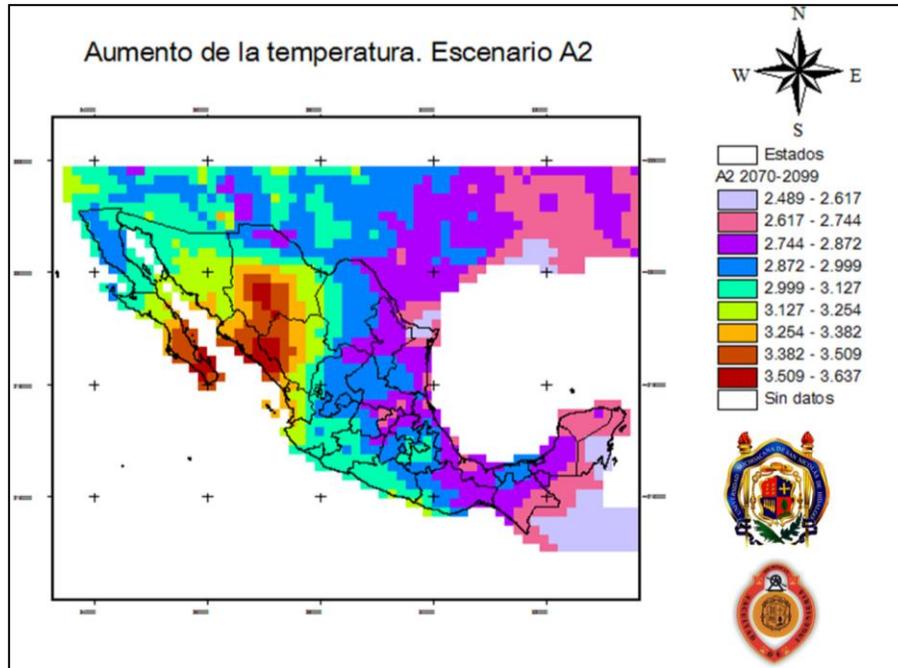


Figura 2.31 Escenario (ensamble) de cambio en temperatura (°C) A2 para los años 2070-2099. Fuente INE 2007.

Para la proyección de cambio en la temperatura bajo el escenario o línea evolutiva A1B la magnitud de los aumentos en temperatura disminuye 1°C que en el escenario con una dispersión aproximada entre 0.5 y 1°C para los años 2010-2039, para los años 2040-2069 la temperatura se incrementa entre 1 y 2.5°C con una dispersión de 0.5°C y 1°C. Como en el caso de A2, el ensamble de los MCGAO-A muestra que es en la región noroeste del país en donde se producen los mayores cambios en temperatura, alcanzando incrementos entre los 2.2 y los 3.3°C para los años 2070-2099 con una dispersión entre 0.5 y 1.25°C (figura 2.32).

La línea evolutiva B1 es el que menores cambios presenta, en la temperatura para México. En lo correspondiente a los años 2010-2039 tiene un incremento de 0.5°C con una dispersión aproximada de 0.25°C para la mayor parte del país. En el periodo de años 2040-2069 se tienen incrementos de temperatura de entre 1 y 1.5°C con una dispersión entre 0.25 y 0.75°C. En lo correspondiente a los años 2070-2099 la temperatura se incrementa entre 1.5 y 2.2°C (figura 2.33), la dispersión para estos años es de 0.5 a 1°C para las diferentes regiones del país.

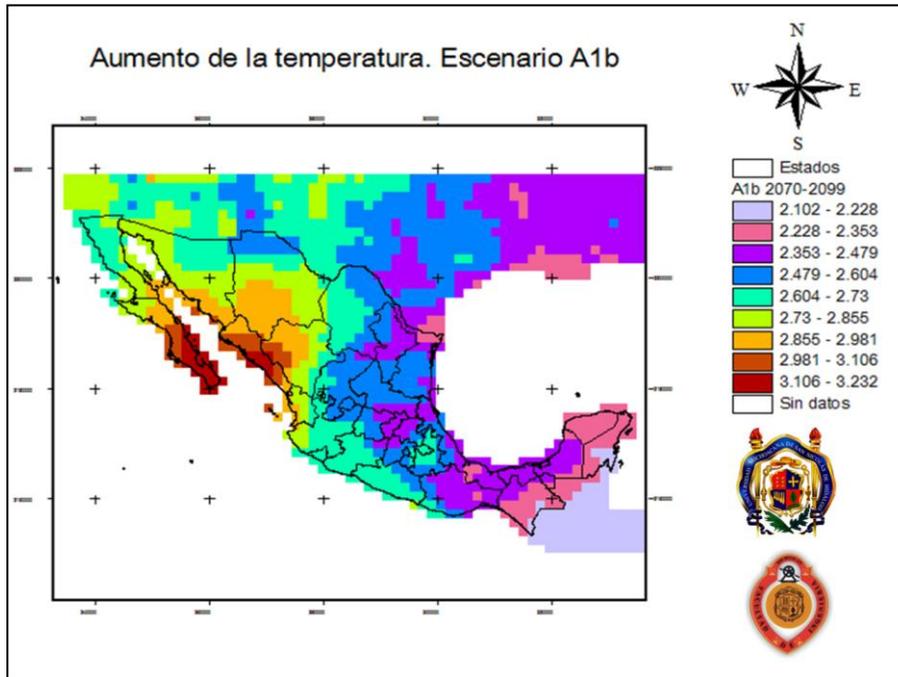


Figura 2.32 Escenario (ensamble) de cambio en temperatura (°C) A1B para los años 2070-2099.

Fuente INE 2007.

Haciendo un análisis de los tres escenarios podemos ver que los mayores incrementos se presentan en el escenario A2, seguido por el escenario A1B y finalmente el escenario B1. Estos cambios indican que nuestro país será más cálido afectando principalmente el norte del país donde se podrían presentar problemas severos de olas de calor y disminución de la disponibilidad del recurso hídrico.

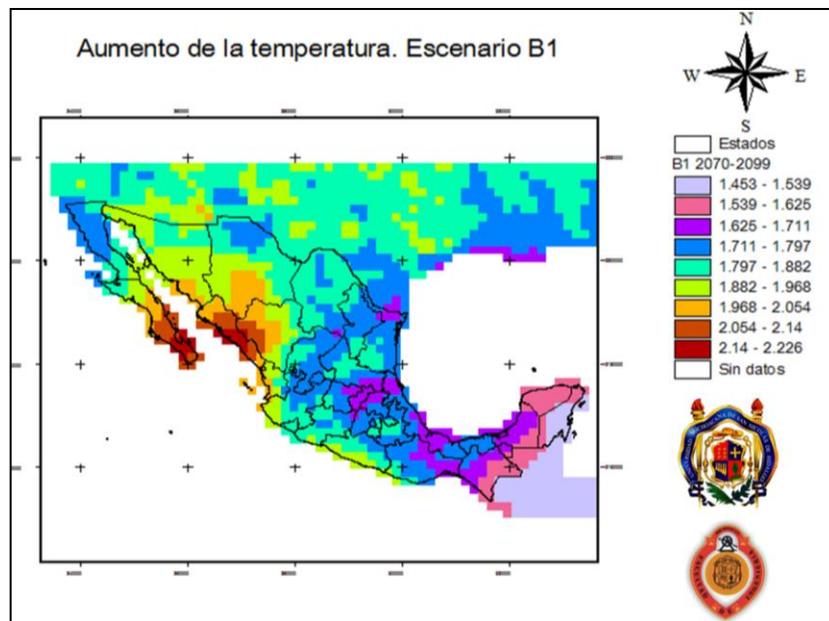


Figura 2.33 Escenario (ensamble) de cambio en temperatura (°C) B1 para los años 2070-2099.



2.4.4.9 Escenario ensamble de precipitación regionalizado (CPT).

La señal de cambio climático en la lluvia sobre la región de México y Caribe muestra en promedio entre MCGAO-A un decremento en la precipitación anual acumulada. Sin embargo, la mayoría de las proyecciones de precipitación de los MCGAO-A para finales de siglo indican que esta región es una en la que se tiene mayor incertidumbre en sus proyecciones (Meehl et al., 2007).

Las anomalías respecto a la climatología construida en el periodo 1970-1990 alcanzan -20% para los años 2010-2039, un -25% para 2040-2069 y hasta un -30% menos de lluvia en el acumulado anual bajo el escenario A2 (figura 2.34). La dispersión para las diferentes climatologías son de 5 a 15%, 7 a 20% y 8 a 30% respectivamente.

Para los años 2070-2099 se presenta una condición más seca principalmente en la Península de Baja California y en el noroeste y centro de México (figura 2.34). Las mayores incertidumbres sobre dichos cambios se presentan en la península de Baja California, no sólo porque ahí se tiene la mayor dispersión entre proyecciones sino porque ahí, gran parte de la precipitación está asociada al paso de ciclones tropicales, los cuales son difíciles de proyectar bajo cambio climático. Las variaciones cuando se tiene o no un ciclón tropical pueden ser mayores que las proyecciones de disminución en la precipitación.

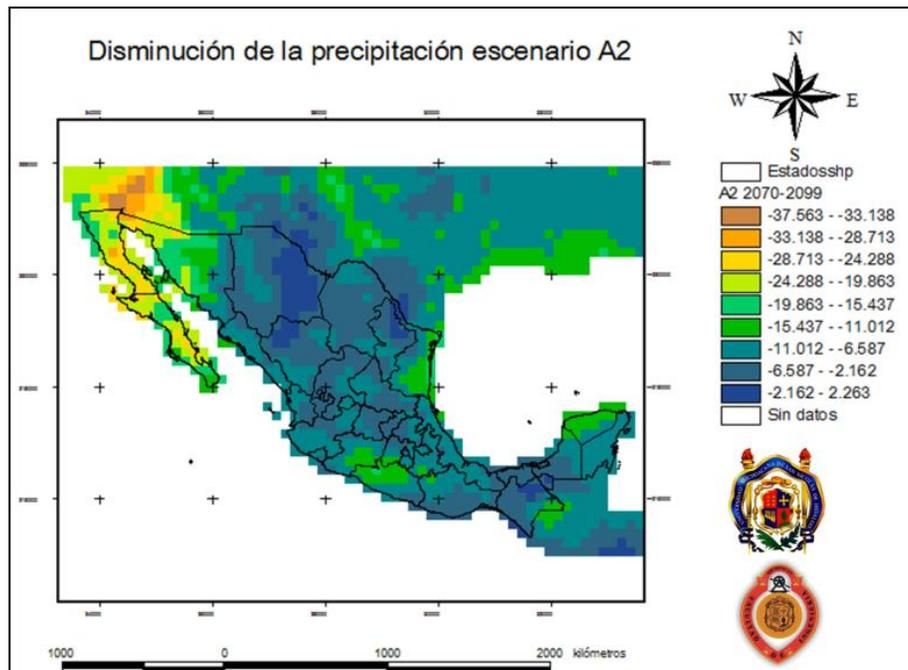


Figura 2.34 Escenario A2 (ensamble) para el cambio de precipitación (%) para los años 2070-2099. Fuente INE2007.

El escenario A1b tiene un comportamiento similar al escenario A2 para México, pero en menor magnitud, en los años 2010-2039 se estiman reducciones en la precipitación de hasta -15% con una dispersión entre 6 y 22%. Para los años 2040-2069 se reduce la precipitación alcanzando -18%



con una dispersión entre 6.5 y 24.5%. Finalmente entre 2070-2099 la precipitación se reduce hasta un -22% (figura 2.35) y su dispersión varía entre 7.7 y 25%.

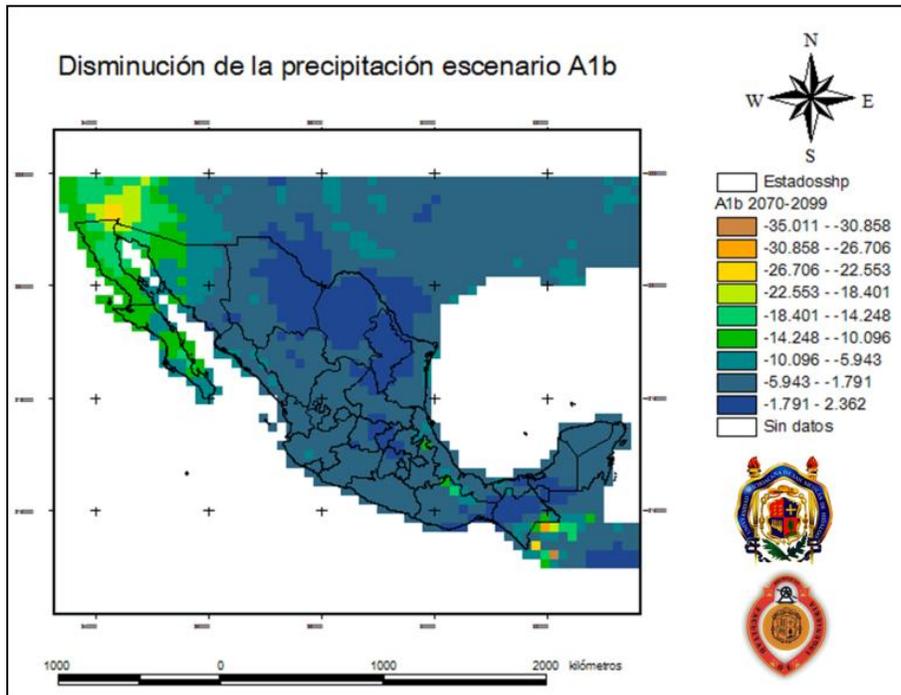


Figura 2.35 Escenario A1B (ensamble) para el cambio de precipitación (%) para los años 2070-2099. Fuente INE2007.

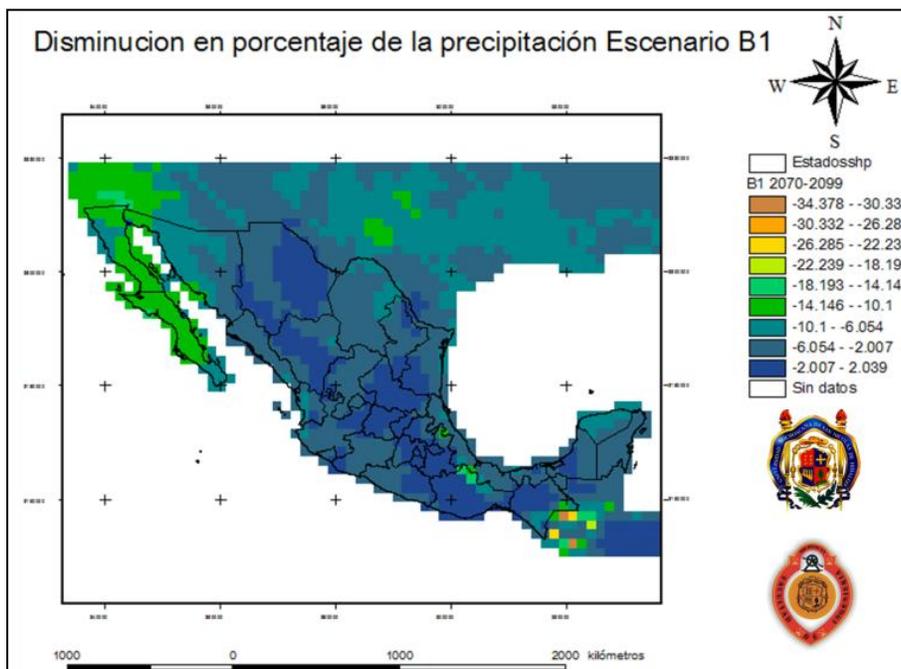


Figura 2.36 Escenario A1B (ensamble) para el cambio de precipitación (%) para los años 2070-2099. Fuente INE2007.



El escenario B1 al igual que el escenario A1B se comporta de manera similar al escenario A2, más sin embargo su magnitud es menor que en los otros dos escenarios. Haciendo análisis de los resultados se tienen cambios similares para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099 con disminuciones máximas en la precipitación de -15% -16% -17% respectivamente. Las dispersiones se encuentran entre 6 y 26% para las tres climatologías. En la figura 2.36 se muestra la disminución de porcentaje para el escenario B1 en los años 2070-2099 (figura 2.36).

En el cuarto informe de evaluación del IPCC se señala que aunque el cambio climático en México y el Caribe apunta a una condición seca, este resultado no es tan confiable debido a que gran parte del régimen pluviométrico de esta región se encuentra definido por la actividad de huracanes, y estos sistemas no son bien modelados aún por los MCGAO-A.

2.4.4.10 Escenarios de cambio climático regionalizados para Michoacán.

El ensamble multimodelo para el cambio climático en el estado de Michoacán estima decrementos en la precipitación y aumentos en la temperatura de la siguiente manera:

El escenario SRES A2 estima cambios en la precipitación entre -5.5 y -15% (figura 2.37) para el caso más crítico que se da entre los años 2070 y 2099. La temperatura para este mismo periodo de años tiene incrementos que varían entre los 2.8 y 3.05°C (figura 2.37) en promedio anual.

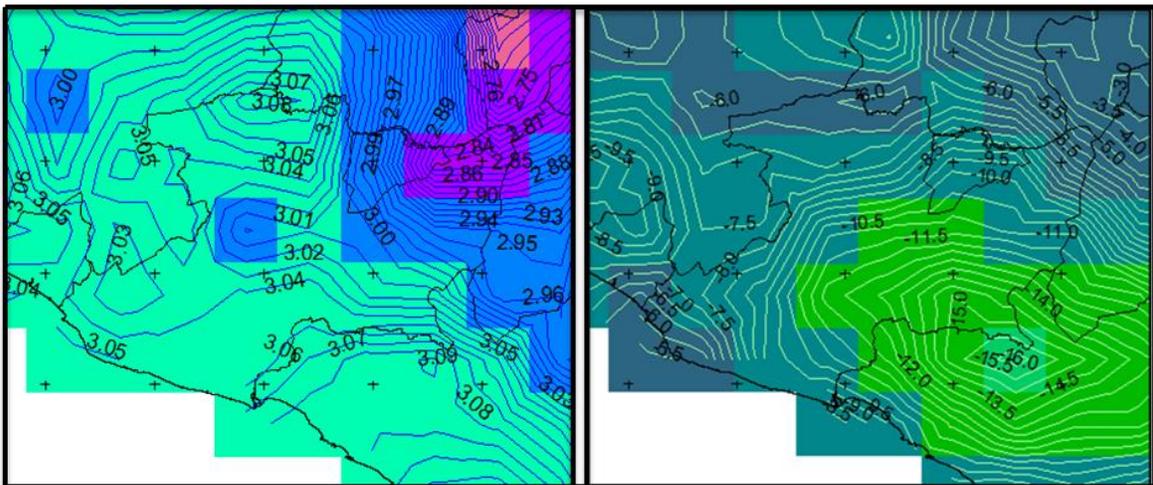


Figura 2.37 incremento en la temperatura (izquierda) y disminución de la precipitación (derecha) para la línea evolutiva A2 en el estado de Michoacán. Fuente INE 2007.

Para el escenario SRES A1B se tienen cambios en la precipitación menores que en el escenario A2, la precipitación disminuye para el estado de Michoacán entre -2.1 y -5.1%; esto ocurre entre los años 2070 y 2099. La temperatura por otra parte presenta incrementos en el estado que varían entre los 2.4 y 2.68°C (figura 2.38).

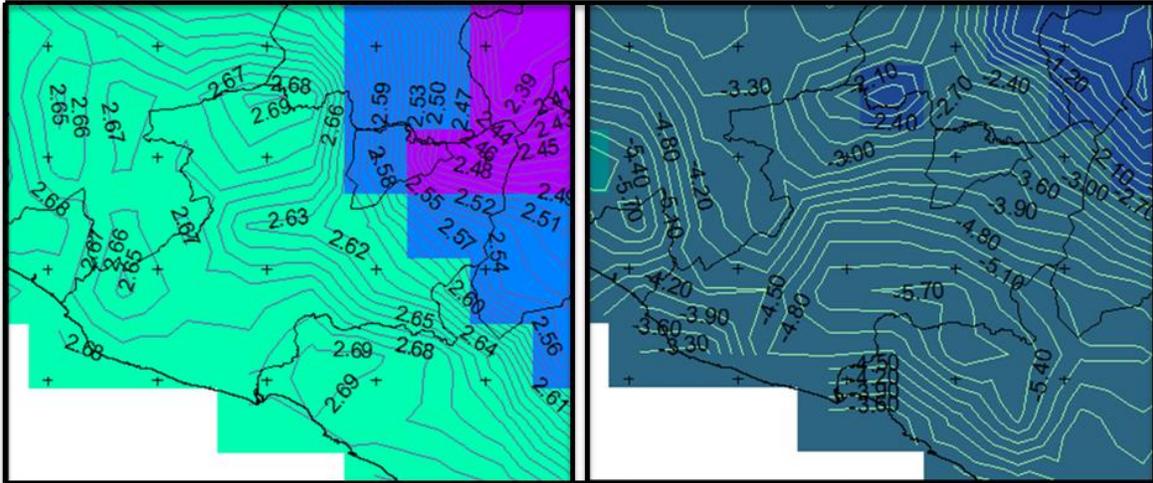


Figura 2.38 incremento en la temperatura (izquierda) y disminución de la precipitación (derecha) para la línea evolutiva A1B en el estado de Michoacán. Fuente INE 2007.

El escenario más optimista de los que veremos en el presente trabajo es el B1, en el cual podemos ver que la precipitación en promedio, para los años 2070-2099 se reducirá -0.6 a -4.5% (figura 2.39), e incrementos de temperaturas de 1.7 a 1.88°C, y que son considerablemente menores que en los escenarios A2 y A1B vistos anteriormente.

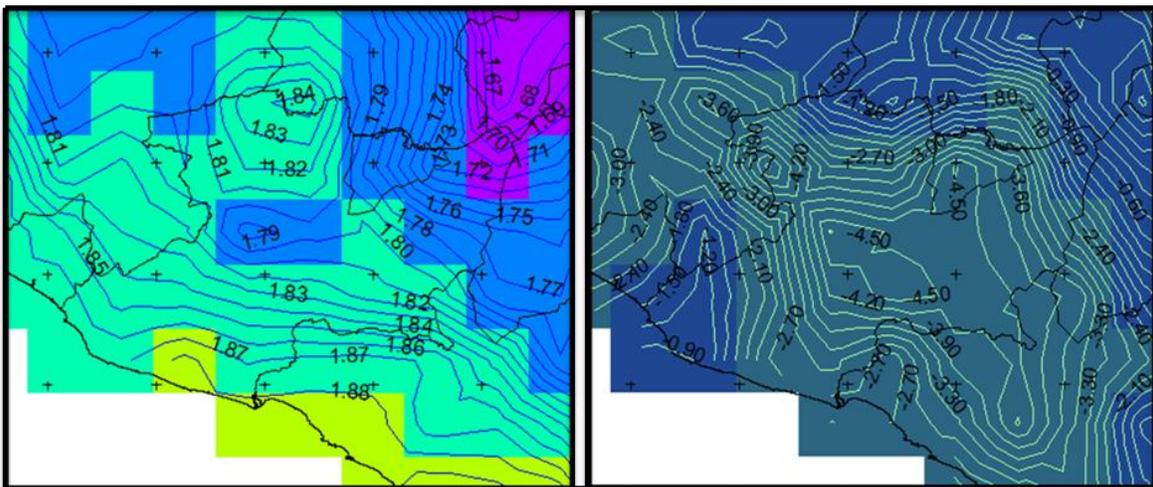


Figura 2.39 incremento en la temperatura (izquierda) y disminución de la precipitación (derecha) para la línea evolutiva A1B en el estado de Michoacán. Fuente INE 2007.

Es de esperarse que la combinación de incremento de la temperatura y disminución de las lluvias, haga de Michoacán un estado árido. Eso necesariamente tendrá impactos muy negativos en la producción agropecuaria y forestal del estado, además de tener también un impacto negativo en la flora y fauna silvestre. Es muy probable que la producción de maíz y la productividad de forrajes para el ganado disminuyan su rendimiento por hectárea, y sea necesario cambiar de cultivo o de variedad a otros cultivos y variedades que sean más resistentes a una mayor temperatura y menor



cantidad de lluvia. Aún cambiando a otros cultivos más resistentes a las nuevas condiciones climáticas, habrá una disminución de la producción en el campo.

De manera global, se ha estimado que la producción agrícola en México disminuirá entre un 5 % y un 30 % para el año 2080, debido al calentamiento global (Parry et al., 2004).

En lo que concierne a las especies forestales gradualmente estarán más y más estresadas por el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación, lo que disminuirá la producción de madera. Es muy probable que el calentamiento global haga que los árboles sean más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, debido al debilitamiento provocado por el estrés, y eventualmente mueran.

2.5 Estudios de evaluación de los efectos del cambio climático realizados en México.

En México solamente el Instituto Mexicano de Tecnología del agua es el único organismo que ha realizado estudios de este tipo, más sin embargo son estudios a gran escala, por lo tanto solo sirven para de manera general observar el efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales, así como las características generales de vulnerabilidad social e hídrica y la sensibilidad del sistema climático.



3 METODOLOGÍA

La metodología para la estimación de los efectos del cambio climático requiere de una evaluación integrada de los recursos hídricos, lo cual hace necesario la utilización de varios modelos de simulación, anidados secuencialmente para la obtención de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. El uso de estos modelos es debido a la compleja interacción entre los diferentes elementos que forman los sistemas de recursos hídricos hablando cuantitativamente y cualitativamente. El esquema de metodología se muestra en la figura 3.1.

Para llegar a estos resultados primeramente debemos conocer el área de estudio lo más detallada posible y contar con registros históricos confiables de las diferentes variables climáticas y tener bases de datos de buena calidad para tener una mayor confiabilidad de los resultados que se obtengan.

Una vez teniendo las variables climáticas para el área de estudio se deben de analizar los diferentes resultados de los MCGAO-A y sus respectivas regionalizaciones para el área en estudio ya que estas tienen una mayor calidad de los resultados de los diversos escenarios climatológicos. Los resultados principales tanto de los MCGAO-A como de los modelos regionales son la temperatura y la precipitación.

Es de vital importancia para el estudio la correcta selección de los escenarios, ya que, de esto dependerán los resultados de todos los procedimientos siguientes, estas decisiones son tomadas generalmente por los expertos en el tema, atendiendo a los requerimientos de los usuarios. Los escenarios también se pueden elegir en base a las diferentes condiciones que se pretendan analizar, por ejemplo: si queremos ver las condiciones más críticas que podrían presentarse, teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados que pueden presentar los MCGAO-A de acuerdo a su lugar de origen e institución de desarrollo, o si pretendemos ver cuales serian los menores cambios a corto mediano o largo plazo. De manera general la adecuada selección de escenarios depende directamente del tipo de criterio que deseemos aplicar en el transcurso del trabajo.

Una vez obtenidos los escenarios de cambio climático para el área de estudio procedemos a realizar la simulación del ciclo hidrológico mediante el modelo lluvia escurrimiento, a escala temporal mensual. Este modelo nos permitirá observar de manera estacional como se reducirán los recursos hídricos en las distintas componentes del sistema de recursos hídricos, ejemplos pueden ser: aportaciones al sistema superficial, recargas al sistema subterráneo, coeficiente de escurrimiento, humedad de las capas superiores de suelo, entre otros.

Simultáneamente a la obtención de los escurrimientos superficiales y recarga al acuífero se puede hacer un análisis de los cultivos predominantes en la zona y los cuales se agrupan por demanda agrícola (Módulos de riego), es decir un conjunto de cultivos que son abastecidos por una o varias redes de distribución, los cuales tienen cercanía en su posición geográfica (ubicación). Las demandas agrícolas se obtienen para periodos actuales y para los diferentes escenarios de cambio



climático futuros utilizando para ellos la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.

De igual manera a los procesos anteriores se obtienen los incrementos de las demandas urbanas en base a los escenarios de incremento de población considerados en los MCGAO-A (considerando de manera singular cada población o localidad, debido a que ninguna de las poblaciones crece de la misma manera) y a la metodología desarrollada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para proyección de la población y demanda.

Una vez obtenidas las temperaturas para los diferentes escenarios de cambio climático se puede correlacionar la evaporación en el embalse, con el volumen del mismo y la temperatura actual. Una vez realizada la correlación múltiple se puede obtener la evaporación para los diferentes escenarios en los embalses que se encuentren en el área de estudio.

Después de contar con los resultados de los escurrimientos superficiales (aquellos que llegan a un embalse), se puede correlacionar los escurrimientos actuales y futuros con los volúmenes de sedimentos en el embalse. Para esto es necesario contar con un estudio topobatimétrico de los embalses en estudio y ver la disminución de la capacidad de cada uno de ellos desde su puesta en marcha hasta la actualidad.

Una vez obtenidos los escurrimientos superficiales y las recargas a el acuífero se procede a hacer la simulación subterránea de los acuíferos que intervengan en el área de estudio incluyendo todas sus acciones elementales (bombeos y recargas), actuales y futuras. La evolución del estado del acuífero se puede obtener en la simulación del sistema subterráneo, o en el modelo de gestión integrada de los recursos hídricos.

Una vez analizados todos los procesos cuantitativos antes vistos, se procede a calibrar el funcionamiento hidráulico mensual del sistema de recursos hídricos, para esto es necesario conocer los volúmenes del embalse, las demandas urbanas, agrícolas, industriales, extracciones del acuífero, así como las aportaciones al sistema. Todos estos datos deben ser lo más actuales posibles ya que en base a estos se hace una calibración del sistema hidráulico tanto superficial como subterráneo. Posteriormente se analiza mediante los modelos de gestión de los recursos hídricos SIMGES (Andreu et al. 1996) para reproducir la gestión en los sistemas de recursos hídricos y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas, y en los caudales ecológicos y reservas ambientales establecidas en dichos sistemas. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación.

Los diversos modelos con los que se realizó en el presente trabajo han sido utilizados en España y otras partes del mundo los cuales han sido validados en los últimos años por su utilización cotidiana tanto en los ámbitos de planificación como de gestión de cuencas.

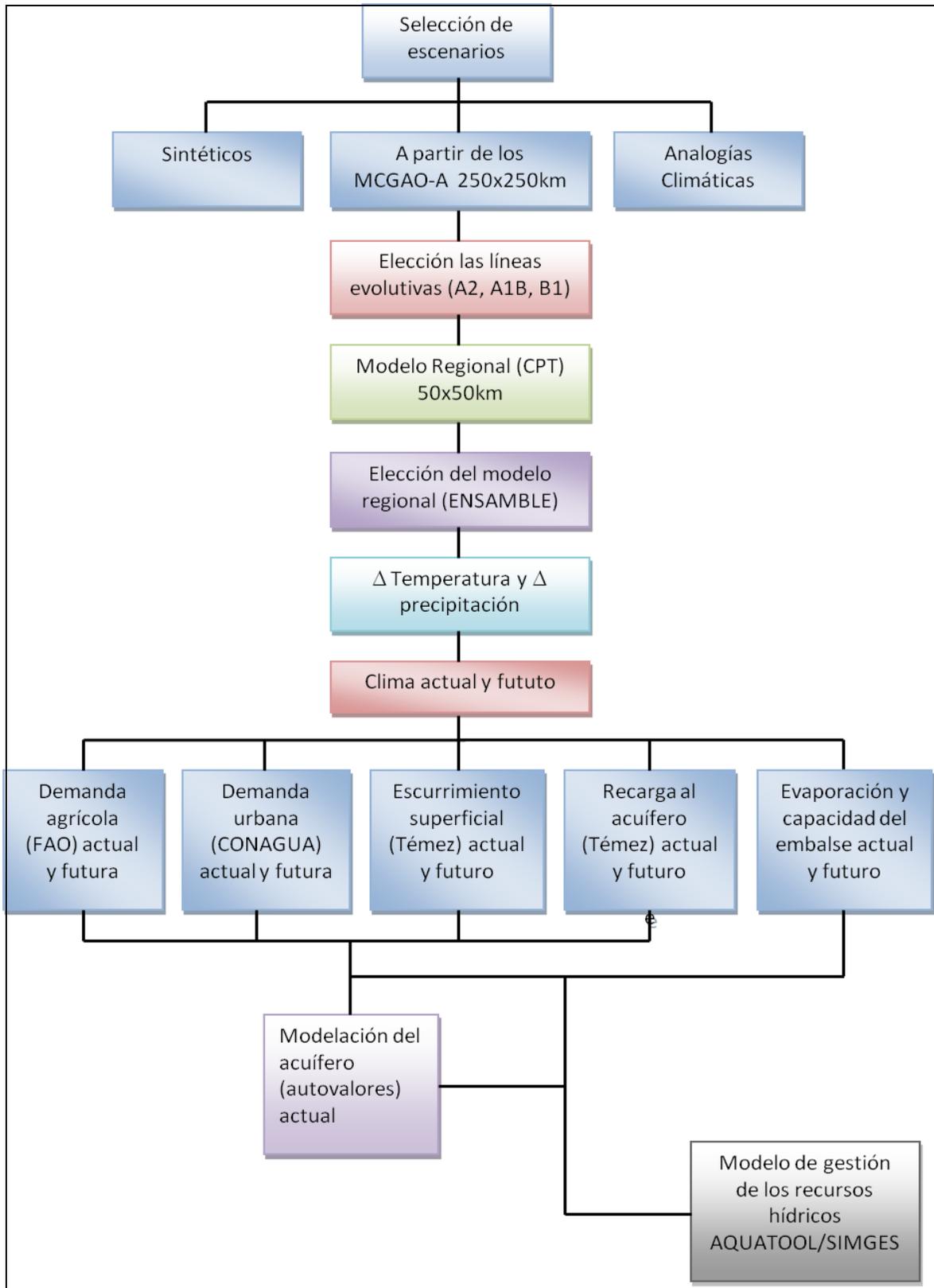


Figura 3.1 Metodología para evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos.



3.1 Selección de escenarios climáticos.

Para la selección de los escenarios es importante conocer las metodologías para llegar al resultado las cuales son: los escenarios sintéticos, escenarios basados en analogías climáticas y los escenarios obtenidos a través de los MCGAO-A.

Los escenarios sintéticos son aquellos en los que se hacen modificaciones a las variables climáticas analizadas, para nuestro caso temperatura y precipitación. Estos escenarios parten de un conocimiento general, más no un conocimiento específico para el área de estudio, por lo tanto nos sirven principalmente para observar la sensibilidad de los modelos, ante los cambios en las variables que se está modificando.

Los escenarios basados en analogías climáticas son aquellos que tienen similitudes históricas con otras zonas de estudio ya analizadas, por lo tanto hay un cierto grado de confianza de que las condiciones presentadas en estudios previos se puedan presentar para el caso en particular que se está analizando. Debido a que se tienen que hacer muchas hipótesis, estos escenarios sirven para ver de manera general como están cambiando las variables climáticas y por lo tanto solamente nos dan una idea del rango donde se podrían presentar los resultados para el área de estudio.

Los escenarios obtenidos a través de los Modelos de Circulación Acoplados Océano Atmósfera (MCGAO-A) en la actualidad son los más confiables, debido a que tienen un fundamento teórico, y tratan de predecir el clima en base no solo a los comportamientos históricos de las variables, sino al comportamiento futuro de las mismas, expresando resultados de mayor calidad que los otros dos tipos de escenarios.

De acuerdo a Magaña et al. (2007) la generación de los escenarios de cambio climático es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático, pues de ellos depende la dirección de los resultados de la evaluación. La selección de los escenarios debe ser una decisión balanceada y cuidadosamente planeada. Los escenarios de cambio climático deben ser seleccionados para brindar información que sea: fácil de obtener o derivar; suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto; representativa del rango de incertidumbres de las proyecciones y; físicamente consistente en el sentido espacial. En la práctica, sin embargo, es difícil poder reunir todas esas características en un escenario, pues la representación de ellas depende, en buena medida, del método que se emplee en la creación del escenario.

Los resultados de los experimentos desarrollados con MCGAO-A pueden ser combinados con las salidas de modelos climáticos más simples, y así para poder evaluar los resultados de los primeros bajo una gran variedad de supuestos sobre las futuras emisiones de gases de efecto invernadero. En el 4º Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental para Cambio Climático (AR4-IPCC, 2007), los escenarios se centran en proyecciones de temperatura y precipitación.

Para la elección del escenario es importante hacer un análisis previo de los modelos disponibles en la zona, posteriormente sería importante comprobar si para el área de estudio los modelos hacen



adecuadas proyecciones, ya que no todos los modelos tienen proyecciones confiables para todas las latitudes. Por ejemplo un modelo desarrollado en Canadá puede que exprese buenos resultados para todas las latitudes donde se encuentra en país, pero puede que para países como Cuba, México o Guatemala, los resultados sean incongruentes.

Para saber si algún modelo predice el clima en el área que se presente estudiar, se recomienda hacer un promedio mensual de las diferentes variables climáticas en periodos de 30 años, ya que en este periodo de tiempo se pueden observar con mayor precisión cómo se comportan las variables climáticas. Es de vital importancia analizar varios modelos simultáneamente para ver el comportamiento de todos en los diferentes periodos de tiempo. En caso de que algún modelo presente incongruencias o valores muy extremos se deberá desechar, y se deberá de tener cuidado en que el modelo que se elija se encuentre en el rango promedio de los modelos, ya que en esta zona es donde se tiene la mayor probabilidad de ocurrencia de los cambios en las temperaturas como en las precipitaciones.

A partir de estos escenarios es necesaria una reducción de escala de 250 km x 250 km que son los resultados de los MCGAO-A, a una escala de 50 km x 50 km. Esto para contar con una mejor resolución espacial y mejor calidad en los resultados ya que el proceso de regionalización no es solamente interpolación, sino que se ve afectada por todas condiciones, como las topográficas, climatológicas, hidrológicas, uso y tipo de suelo de la zona. Esta reducción de escala nos proporciona datos de mayor calidad para el área de estudio con lo cual se pueden hacer análisis de disponibilidad de los recursos hídricos.

Los escenarios climáticos generados por el modelo regional CPT (Mason J. et al. 2011) software desarrollado por el International Research Institute for climate and Society (IRI), de la universidad de Columbia. La regionalización de los escenarios para México la realizaron investigadores del Centro de Ciencias de la Atmosfera, de la Universidad Autónoma de México (UNAM). En conjunto con la Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología (INE 2007).

El procedimiento anteriormente descrito lo podemos resumir en la (figura 3.2) donde se observa cómo elegir los escenarios climáticos SRES del IPCC 2006, que parte con la elección de la o las familias de emisiones de gases de efecto invernadero que para el siglo XXI, con estos escenarios y los MCGAO-A se crean los escenarios de temperatura y precipitación con una resolución de 250 km. Posteriormente pasando a la etapa de regionalización por medio del programa CPT obteniendo los detalles de las variaciones futuras de las temperaturas y precipitaciones (para una resolución de 50 km) para los años 2000-2100.

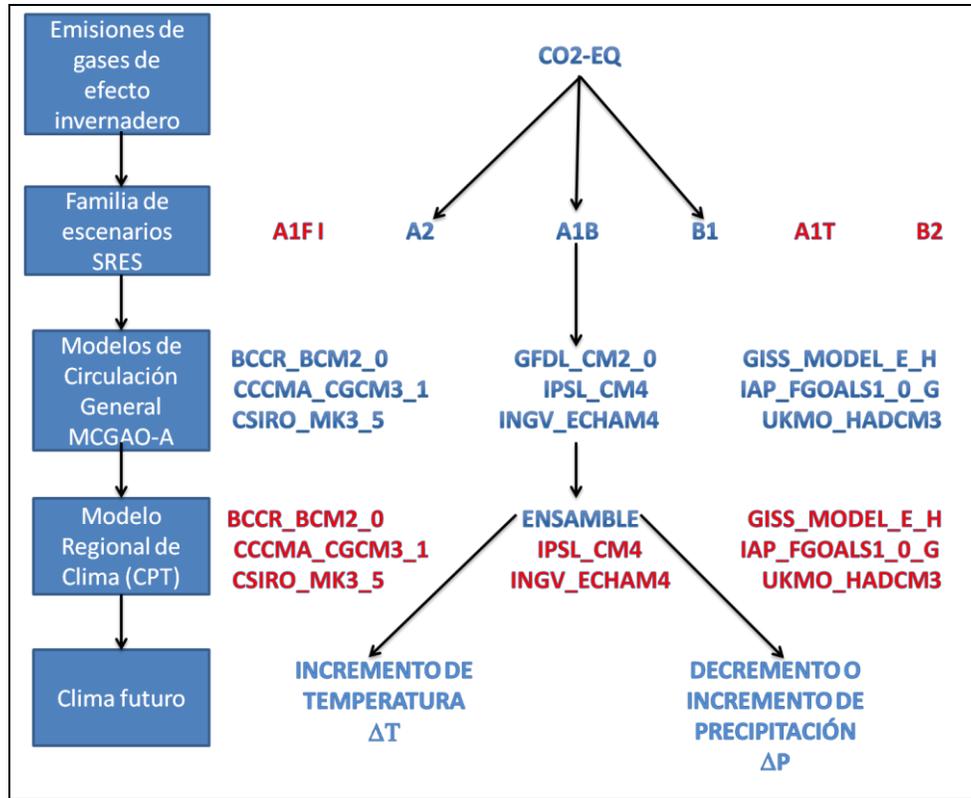


Figura 3.2.- Proceso secuencial de la determinación de los escenarios climáticos del modelo regional CPT a partir de los escenarios de emisiones SRES y de MCGAO-A más de 20 MCGAO-A.

3.2 Modelo lluvia escurrimiento

A finales de los setentas se diseñó un modelo lluvia escurrimiento de manera estacional, el cual contaba con un reducido número de parámetros a diferencia de otros modelos que contaban con un gran número de parámetros y que su obtención o estimación es muy difícil de obtener, ante esta necesidad surge el modelo de Témez (Témez 1977), este modelo permite que se produzca excedente sin necesidad de que el suelo este totalmente saturado, además de realizar un reparto más realista del excedente, entre el agua que constituye el escurrimiento superficial y la recarga al acuífero.

Según Ruiz et al., (1998) el modelo de Témez presenta una serie de características que lo convierten en cuasi-distribuido. Este modelo se puede aplicar a zonas de características iguales de manera estacional dando muy buenos resultados en escala mensual, además nos permite evaluar los recursos hídricos en grandes cuencas. El modelo simula los procesos implicados en la producción de escurrimiento mediante ecuaciones de transferencia y balance. Las principales variables implicadas son la evapotranspiración real, infiltración, humedad en el suelo, volumen de agua almacenada en los acuíferos, aportaciones superficiales y aportaciones subterráneas tal como se muestra en la figura 3.3.



De acuerdo a Hernández L. et al., (2007) la obtención de las aportaciones está fundamentada en la interacción entre el clima y la superficie del suelo, y su cubierta. La capacidad de retener agua por parte del suelo, y de ser utilizada por las plantas, trae como consecuencia que el agua de lluvia, o una parte de ella quede retenida y disponible para que las plantas la evapotranspiren. La reserva de agua utilizable por las plantas, que es función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y profundidad radicular media, incorpora agua de precipitación y transmite agua a la atmósfera por evapotranspiración de un modo continuo llenándose o vaciándose, según sean superiores las entradas o las salidas, hasta que se llega a un punto en que el suelo no admite más agua, se llena la reserva y se genera el escurrimiento o la recarga de los acuíferos con los excedentes.

Podemos utilizar datos mensuales de precipitación y evapotranspiración (calculada anteriormente) en base a las estaciones meteorológicas que se encuentren en y cerca de la zona de estudio, además de ser necesario contar con estaciones hidrométricas o de aforo ubicadas en lugares estratégicos, también es de vital importancia contar con el coeficiente de escurrimiento de la cuenca que depende del uso y el tipo de suelo, así como los acuíferos con los que está conectado el sistema superficial y de estos a su vez conocer el coeficiente de desagüe del acuífero que se puede estimar mediante la relación de las salidas por manantiales y las salidas totales.

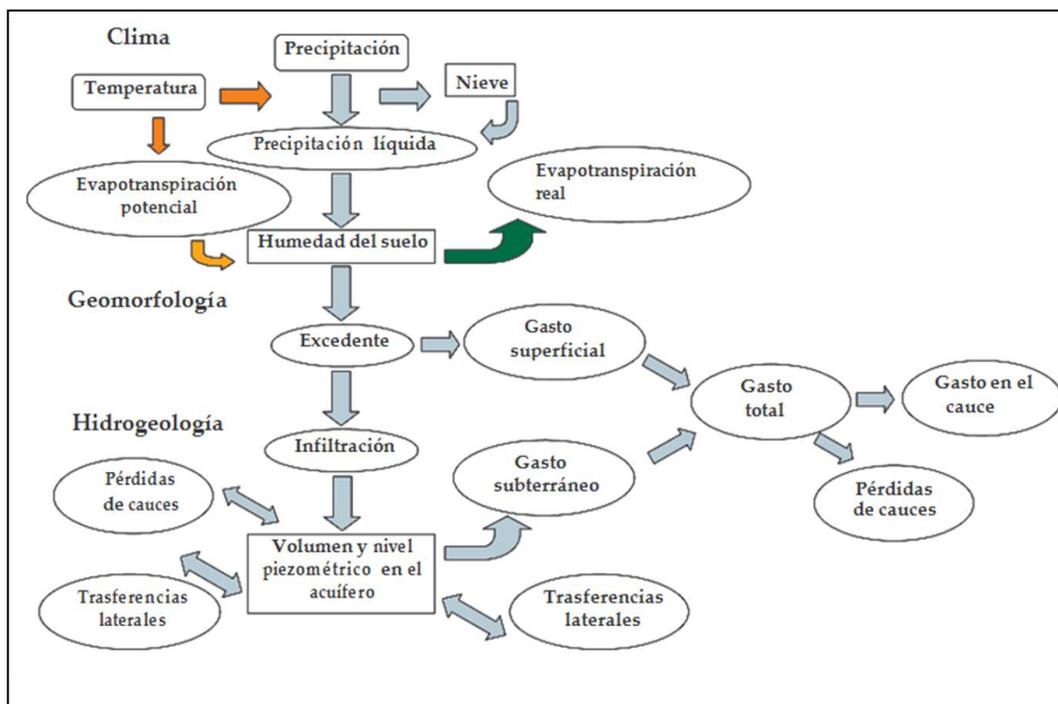


Figura 3.3. Esquema de flujo del modelo de Témex (Pérez 2005).

Una vez conociendo las variables de entrada al modelo se procede a la calibración del mismo mediante análisis paramétrico de la capacidad máxima de almacenamiento hídrico, la infiltración máxima, los cuales se pueden estimar de los mapas de uso de suelo, geología y tipo de suelo. El modelo hidrológico permite la evolución de las variables implicadas siendo posible poder evaluar



el cambio climático en los recursos hídricos o la alteración de los usos del suelo, los impactos entrópicos, entre otros.

Es muy importante conocer el volumen total de agua contabilizable (aportaciones) anualmente en un punto de una cuenca hidrológica en régimen natural, ya que están inicialmente condicionadas, por la precipitación, la temperatura, el uso y cubierta del suelo y las características del suelo y subsuelo y si estas cambian positiva o negativamente, así será la variación a las aportaciones.

En México el uso del agua superficial presenta grandes deficiencias por lo que siempre se tienen volúmenes de retornos en los caudales lo que implica que no sea fácil calcular las aportaciones de los ríos en régimen natural, debido a que los caudales que se miden en ellos estarán alterados por las detracciones para los diversos usos y aplicaciones del agua, por lo que las evaluaciones en régimen natural no siempre se realizan a partir de datos de aforo, debido a que tienen grandes afecciones de los caudales y por lo tanto se utilizan los modelos lluvia-escurrimiento.

3.3 Requerimiento de cultivos

Para el cálculo de los requerimientos de los cultivos se implementó la metodología (figura 3.4) desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) mediante la publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO, titulada "Evapotranspiración del cultivo - Guías para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo, así como el software CROPWAT 8.0 basado en la publicación anteriormente mencionada.

Para el cálculo de los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC), CROPWAT requiere de datos de evapotranspiración (ET_o), para esto es necesario ingresar datos de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar, lo cual permite al programa CROPWAT calcular la ET_o aplicando la ecuación de Penman-Monteith.

El concepto de ET_o fue introducido para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, su desarrollo o su manejo. Como el agua es abundante en la superficie evapotranspirante, los factores de suelo no afectan la ET_o. El relacionar el proceso de evapotranspiración a una superficie determinada proporciona una referencia a la que la evapotranspiración de otras superficies pueden relacionarse. Esto elimina la necesidad de definir un nivel de evapotranspiración diferente y por separado para cada cultivo y para cada etapa de crecimiento. Los valores de ET_o medidos o calculados en distintos lugares o en diferentes estaciones del año son comparables, ya que se refieren a la evapotranspiración de la misma superficie de referencia.

Los únicos factores que afectan a ET_o son los parámetros climáticos. En consecuencia, la ET_o es un parámetro climático y puede calcularse a partir de datos meteorológicos. La ET_o expresa el poder evaporativo de la atmósfera en un determinado lugar y momento del año y no tiene en cuenta las características del cultivo ni del suelo. El método FAO Penman-Monteith es recomendado como el único método para determinar la ET_o. Este método ha sido seleccionado porque proporciona valores que son muy consistentes con datos reales de uso de agua de cultivos en todo el mundo,



como se ha demostrado a través de muchos años de evaluaciones en la literatura científica. Este método supera las deficiencias de métodos recomendados anteriormente, y explícitamente incorpora parámetros tanto fisiológicos como aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la utilización de este método, incluso con pocos datos climáticos.

Una consulta de expertos e investigadores fue organizada por la FAO en 1990, en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, para examinar las metodologías de la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua los cultivos y para asesorar sobre una revisión y actualización de los procedimientos.

El grupo de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como una nueva norma para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y sugirió procedimientos para el cálculo de los distintos parámetros. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado mediante la definición del Cultivo de referencia como un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23. La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua. El método supera las deficiencias del anterior método FAO Penman y proporciona valores más consistentes con el uso real de agua por parte de los cultivos en todo el mundo. (FAO 2009).

Es necesario contar con los datos de precipitación, ya que estos son utilizados por CROPWAT para calcular la precipitación efectiva como datos de entrada para el cálculo de los RAC y de la programación de riego. Por último, los datos de cultivos son necesarios para los cálculos de los RAC, y también datos de suelo si el usuario desea determinar la programación de riego.

Aunque normalmente CROPWAT calcula los requerimientos de los cultivos y las programaciones para un cultivo, también puede calcular un esquema de suministro de agua, que es básicamente la combinación de los requerimientos de agua de varios cultivos, cada uno con su fecha de siembra (patrón de cultivo).

El programa CROPWAT se organiza en 8 módulos diferentes, de los cuales 5 son módulos de datos de entrada y 3 son de cálculo. Estos módulos son accesibles a través del menú principal pero se pueden acceder más fácilmente a través de la Barra de módulos que está permanentemente visible en la parte izquierda de la ventana principal. Esto permite al usuario combinar fácilmente diferentes datos climáticos, de cultivo y de suelo para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, la programación de riego y la entrega de agua en esquemas multicultivos.

Los módulos de entrada de datos de CROPWAT son los siguientes:

1. Clima/ET_o: se ingresan los datos de temperatura mínima, temperatura máxima y se pueden estimar los datos de velocidad del viento, humedad y insolación, con estos datos se puede realizar el cálculo de la ET_o Penman-Monteith
2. Precipitación: para ingresar datos de precipitación y el método de la Soil Conservation Service (USDA) para calcular la precipitación efectiva.



3. Cultivo: para ingresar datos del cultivo como son el coeficiente de desarrollo Kc para las etapas de inicio, desarrollo y fin de temporada, la duración de cada una de las etapas en días, la profundidad radicular, el agotamiento crítico, la respuesta del rendimiento y la fecha de siembra. Opcionalmente se puede agregar la altura del cultivo.
4. Suelo: para ingresar las características principales del suelo como son: la humedad del suelo disponible, la tasa máxima de infiltración de la precipitación, la profundidad radicular máxima y el agotamiento inicial de humedad del suelo.
5. Patrón de cultivo: aquí ingresamos todos los cultivos que intervienen en una misma zona geográfica, es decir los principales cultivos de Módulos de los distritos de riego.

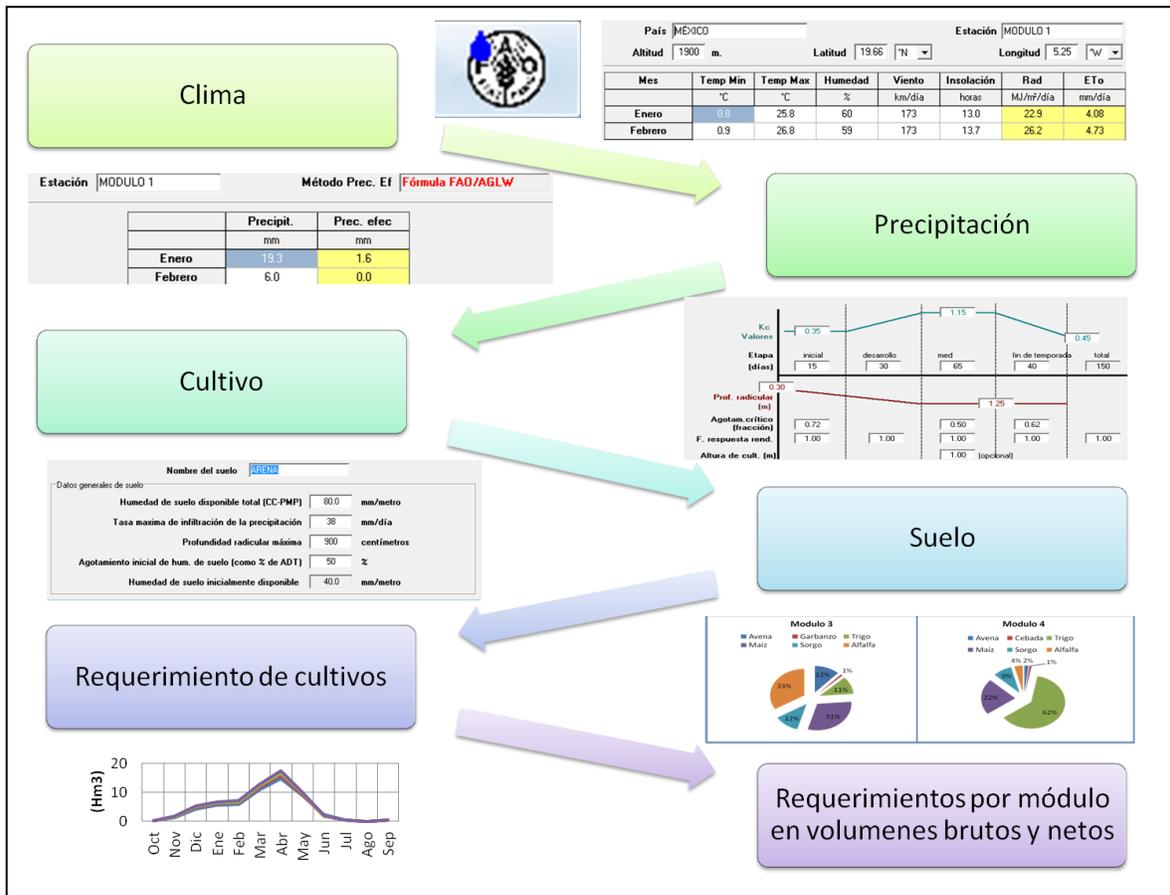


Figura 3.4. Metodología para la obtención de la demanda actual y futura mediante el programa CROPWAT 8.0.

Los módulos de cálculo de CROPWAT son:

1. Requerimiento de agua para cada uno de los cultivos de la zona de estudio.
2. Programación para el cálculo de los calendarios de riego. Permite hacer una programación de los riegos a los diferentes usuarios y analizar la cantidad de agua observada tomando en cuenta la eficiencia del sistema (no utilizado en el presente trabajo).



3. Esquema para el cálculo del régimen de la oferta de agua sobre la base de un patrón de cultivo. Se pueden visualizar el déficit de precipitación para el o los cultivos analizados, así como los requerimientos netos del sistema tanto en mm/mes como en l/s/ha.

Para obtener los requerimientos del sistema incluyendo el con el cambio climático se obtienen las precipitaciones y las temperaturas para los diferentes escenarios propuestos y se estiman los parámetros de de insolación, humedad así como de viento y se obtienen los nuevos coeficientes de cultivo (K_c), los factores de agotamiento crítico y la respuesta del rendimiento. Una vez hecho estos cambios se pueden obtener el requerimiento neto de los cultivos incluyendo el cambio climático (figura 3.4).

3.4 Demanda urbana.

Para analizar la demanda futura es necesario obtener la población de proyecto que es la cantidad de personas que se espera tener en una localidad de diseño y analizar que volumen de agua requerirán. Por lo tanto es necesario analizar los diferentes métodos de proyección de población que pueden ser por comparación o por ajuste de curvas por mínimos cuadrados. Estos métodos se basan en una extrapolación de datos históricos de crecimiento de la población, que suponen que la población crecerá en el futuro con las mismas tendencias como en el pasado. Los métodos para obtener el incremento de la población son:

-  Método de crecimiento por comparación.
-  Método de mínimos cuadrados lineal.
-  Método de mínimos cuadrados exponencial.
-  Método de mínimos cuadrados logarítmico.
-  Método de mínimos cuadrados Potencial.

Para el cálculo del incremento de la población se utilizo el programa DATOS BASICOS de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 2007. Donde además de hacer la proyección de la población podemos conocer los incrementos que se pueden presentar en la demanda urbana. En las grandes ciudades los incrementos en la población y la demanda urbana ocasionaran déficits de abastecimiento para esta y otras demandas.

3.5 Modelo de autovalores

El método de los autovalores se utiliza en aquellos acuíferos conectados con un río para los que se considera necesario el uso de un modelo de parámetros distribuidos. Consecuentemente se requiere una localización detallada de las acciones que se ejercen sobre dichos acuíferos, así como de las respuestas del acuífero. Se ha demostrado que el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987) es el más eficiente para sistemas que puedan ser supuestos lineales, en los que interesa conocer las respuestas (parámetros de control) y sobre los que se ejerzan acciones que puedan ser descritas como combinaciones lineales de unas acciones unitarias predeterminadas (acciones elementales). La aplicación del método de los autovalores permite integrar en un único



modelo las transferencias entre las distintas celdas en las que se ha discretizado el acuífero, reflejar el efecto de las extracciones producidas por los bombeos, así como plantear escenarios futuros.

Para la aplicación del método se ha utilizado el programa AQUIVAL incluido en el módulo SSD AQUATOOL.

La metodología que utiliza el programa AQUIVAL es la siguiente (figura 3.5):

- Definición de geometría, condiciones de contorno y elaboración de una malla de diferencias finitas o elementos finitos adaptada a la forma del acuífero.
- Definición de las características hidrodinámicas del acuífero (transmisividades, coeficiente de almacenamiento).
- Definición de acciones elementales.
- Definición de los parámetros de control.
- Definición de la simulación.
- Calibración y validación.

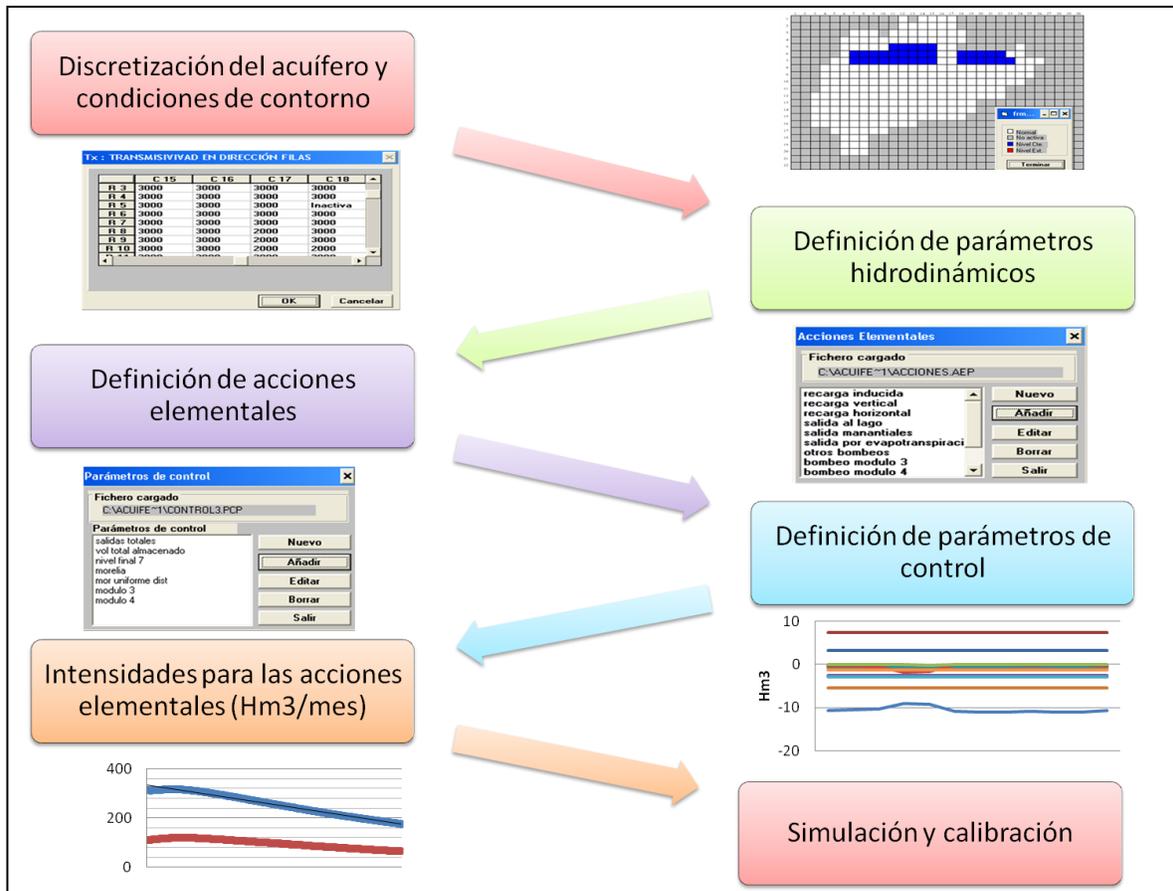
Para la discretización del acuífero, condiciones de contorno y condiciones iniciales es necesario tener conocimientos hidrológico e hidrogeológico del acuífero en estudio, de forma que todos aquellos datos de entrada requeridos para la construcción del modelo de autovalores sean lo más cercanos a la realidad del acuífero.

Las acciones elementales son todos aquellos volúmenes que entran y salen del acuífero a lo largo del tiempo en una zona específica, es decir todos los bombeos, las salidas por evapotranspiración, las salidas por manantiales, la recarga vertical del o por lluvia, así como las transferencias laterales de entrada y de salida.

Los parámetros de control nos indican la evolución del acuífero y nos indican el estado en cualquier parte de la simulación del acuífero, por ejemplo un parámetro de control pueden ser las salidas totales del acuífero, los niveles piezométricos en una celda o conjunto de celdas, el volumen total almacenado, entre otros.

El modelo de los autovalores puede ser definido para régimen permanente (sin bombeos) así como para el régimen transitorio. Este modelo puede tomar como datos de partida los resultados obtenidos del anterior modelo definido en régimen permanente. El modelo a régimen transitorio, se puede utilizar para plantear una serie de escenarios futuros. Se puede dar el caso que debido a la intensa explotación del acuífero se produzca un cambio en las direcciones del flujo y se por lo tanto, que ya no se producen las salidas naturales de los acuíferos hacia el río y por tanto, afectando de manera considerable el sistema superficial.

Una vez construido y calibrado el modelo subterráneo mediante el método de autovalores, el modelo puede conectar con el modelo de simulación superficial para crear un modelo de uso conjunto mediante el módulo SIMGES.



3.5. Metodología para la modelación del acuífero Morelia-Queréndaro mediante el programa (AQUIVAL).

3.6 Sistema de gestión de recursos hídricos AQUATOOL/ SIMGES

La evaluación integrada de los recursos hídricos debe de considerar los sistemas subterráneo y superficial como complementarios, ya que de ambos se extrae agua para todos los usos. En la actualidad el medio ambiente y los usuarios están demandando mayor cantidad de agua, por tal motivo es de vital importancia tener un manejo adecuado del suministro a la demanda. Todas las decisiones tomadas dentro de la cuenca afectan directamente a los usuarios de los distintos sectores, lo cual implica, el tomar las decisiones correctas al planificar el uso del agua y así, evitar el mal uso, el desperdicio, o incluso desastres dentro de la cuenca.

El manejo integrado de cuencas nos ofrece muchas ventajas como:

- La preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente.



- El control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende su distribución y administración.
- La regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua.

En base a todas estas necesidades surgen los sistemas de apoyo a la decisión como una herramienta de diseño para ayudar a contestar preguntas específicas facilitando el empleo de modelos de simulación y optimización para la gestión de los recursos hídricos.

Aquatool (modelo para la gestión de cuencas complejas con uso conjunto) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia que esencialmente nos permite crear los esquemas de simulación para la cuenca en estudio.

El programa SIMGES perteneciente a AQUATOOL es un modelo general para la simulación de los sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamientos superficiales y subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. El uso de SIMGES permite modelar con extrema flexibilidad el sistema hidrográfico, cuya sucesiva simulación proporciona los valores de suministro para cada demanda (Hernández et al. 2007).

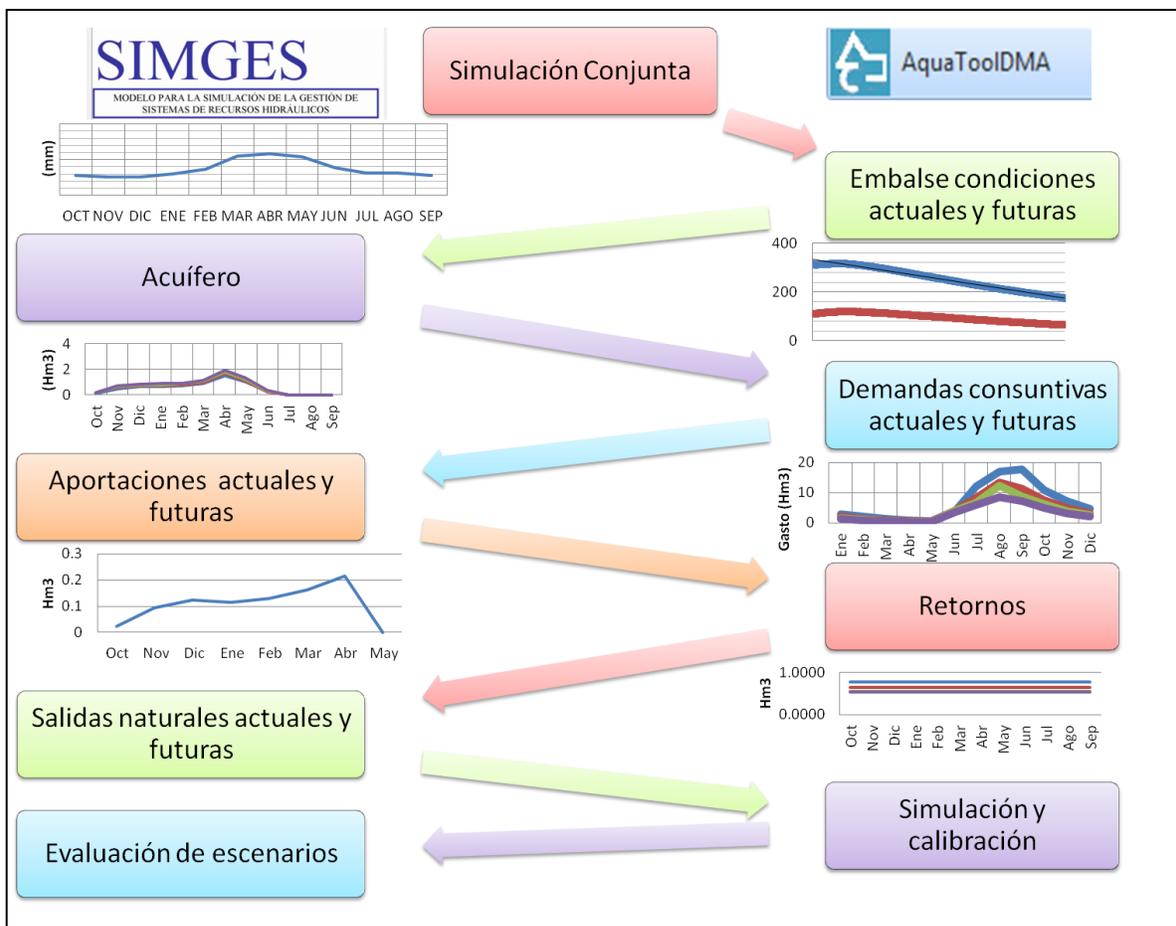


Figura 3.6 Metodología para la gestión del sistema de recursos hídricos mediante el programa AQUATOOL/SIMGES.



En cuestión de resultados, nos permite evaluar múltiples elementos como las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas, industriales, entre otras. De esta manera se pueden conocer las repercusiones futuras que tendría la disminución de recursos hídricos para el sistema de explotación. Para realizar las simulaciones se utilizan las series de aportaciones para condiciones históricas, actuales y futuras.

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología (figura 3.6), han permitido estimar los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos futuros, estas estimaciones corresponden a los cambios en las evapotranspiraciones, en las demandas de riego, en las aportaciones, en los niveles y recargas de los acuíferos anuales y mensuales, en los niveles medios de los embalses y en la evaluación de las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas e industriales una vez realizadas las simulaciones con el modelo de gestión.



4 ZONAS DE ESTUDIO

4.1 Cuenca del río grande de Morelia

La cuenca del río Grande de Morelia se ubica en la Región Hidrológica No. 12, zona B formando parte como subcuenca del Lago de Cuitzeo y micro cuenca del Lago de Cuitzeo y Laguna de Yuriria como se muestra en la figura 4.1.

La zona de estudio se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°35' y 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°45' y 101°25' de longitud oeste. Comprende un área de 1487 km² aproximadamente (Río Grande y Afluentes).

Las elevaciones topográficas que se observan en la zona varían de 1900 msnm, en la porción centro-norte (el lago de Cuitzeo y el poblado Álvaro Obregón) hasta de 2500 msnm en los cerros llamados los Cuantes que se ubican en la parte occidental de la región. La altitud media del valle es aproximadamente de 2200 msnm.

Geográficamente colinda con el estado de Guanajuato al norte, con el poblado de Quiroga Michoacán al occidente, con el municipio de Zinapécuaro al oriente y al sur con la sierra alta y mil cumbres.

El nacimiento de la cuenca ocurre en la colindancia de algunas cuencas cerradas situadas entre el Lago de Pátzcuaro y la del propio Lago de Cuitzeo, sus formadores son los ríos Tiripetío y Tirio que se juntan en un solo colector general, 18 km, antes de llegar a Morelia. De la presa de Cointzio hasta el Lago de Cuitzeo, el río se utiliza como canal de conducción recibiendo varias aportaciones que se utilizan para riego. Recibe aportación procedente del río Chiquito y que se une al río Grande a 11 km, aguas debajo de la presa Cointzio donde este cruza la ciudad de Morelia. Sus últimos 12 km, lo constituye un tramo recto, que cruza los valles Álvaro Obregón-Queréndaro, con rumbo franco sur-norte, que se denomina río Rectificado de Morelia.

El sistema recibe las aguas residuales de la Industria CRISOBA S.A. de C.V., e ingresa a la ciudad por el oeste cruzando el libramiento poniente y el Fraccionamiento Manantiales de Morelia. Así mismo se cuenta con arroyos como los de Atécuaro, del Huerto y Refugio.

Los embalses o cuerpos de agua cercanos son el embalse de Loma Caliente ubicada a 22 km al suroeste de Morelia, Presa de Cointzio ubicada a 11 km al suroeste de la ciudad, el embalse la Mintzita ubicada a 8 km al suroeste de la ciudad y Lago de Cuitzeo ubicado a 39 km al norte de la ciudad.

El arroyo Los Pirules es también otra corriente superficial de importancia y se localiza al oriente de la ciudad de Morelia. Este nace en una pequeña cordillera formada por los cerros Coronilla Grande y el Guajolote, así como en el puerto de Venado. El Arroyo continúa al norte por la carretera Morelia-Mil Cumbres, pasando por el poblado Los Pirules hasta la compuerta cruzando la



carretera Morelia-Charo y desembocando en el Río Grande a la altura de Atapaneo. Este arroyo tiene una longitud de 7.8 km. A lo largo de su trayectoria recibe afluentes que nacen entre los cerros de Punhuato y Prieto, así como de la loma de Gallina y el cerro Colorado.

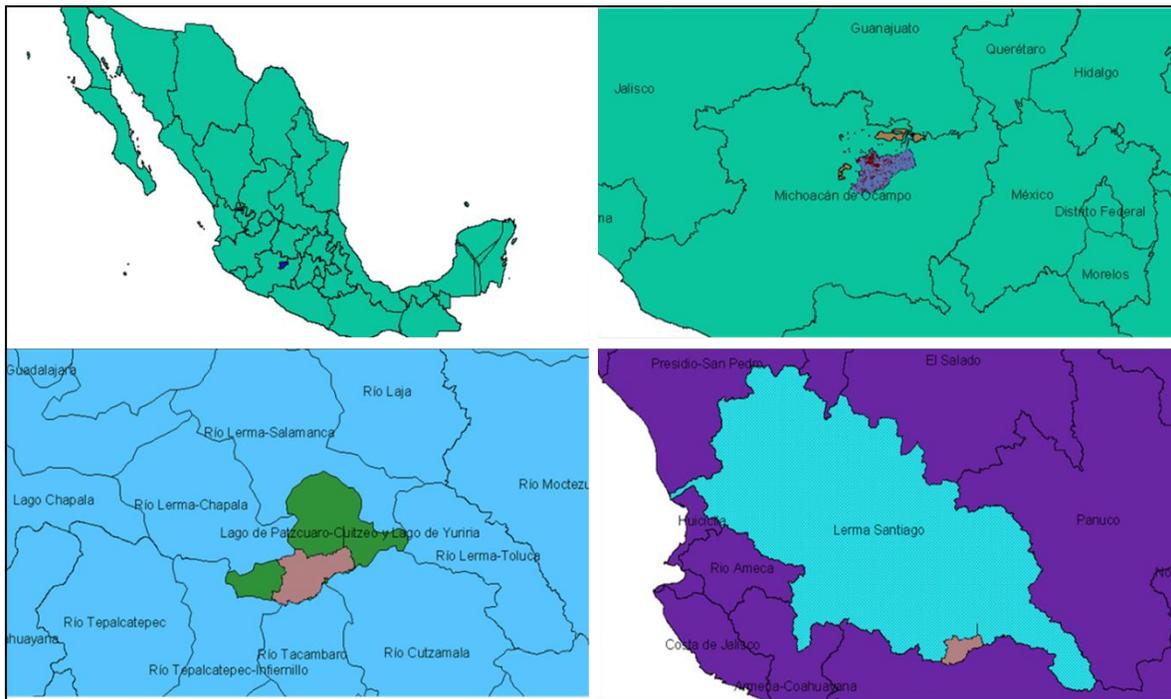
El arroyo Blanco descarga su agua al arroyo los Pirules antes de cruzar la carretera Morelia-Charo, este arroyo nace en el cerro del Punhuato. Su cuenca forman el Cerro Prieto y el Cerro Blanco, con una longitud de 4.0 km.

La cuenca se ubica dentro de la provincia fisiográfica y geológica más recientemente formada en la república mexicana: el eje, o meseta neovolcánica donde las fuerzas internas han actuado de manera preponderante sobre los agentes internos, de tal forma que se ha conformado un panorama montañoso por apilamiento de los materiales producto de la actividad volcánica intensa de esta región, que atraviesa el país desde el Océano pacífico hasta el Golfo de México.

Las rocas aflorantes de la zona son basalto andesítica en su mayoría. En diferentes presentaciones como son; lavas, tobas, aglomerados, cenizas y material piroclástico sin consolidar.

El terreno es montañoso abrupto en su mayor parte, con varios estrechos donde se alojan los principales acuíferos existiendo un gran número de volcanes parcialmente aislados como principalmente en el noreste de Morelia, donde presentan pendientes fuertes y se encuentran parcialmente sepultados por los depósitos cuaternarios.

La actividad tectónica también ha colaborado en la formación de los valles, manifestándose los agentes internos por medio de la existencia de grandes fallas de carácter regional que controlan estos valles, como es el caso de el valle de Morelia-Queréndaro (Barajas 2002).



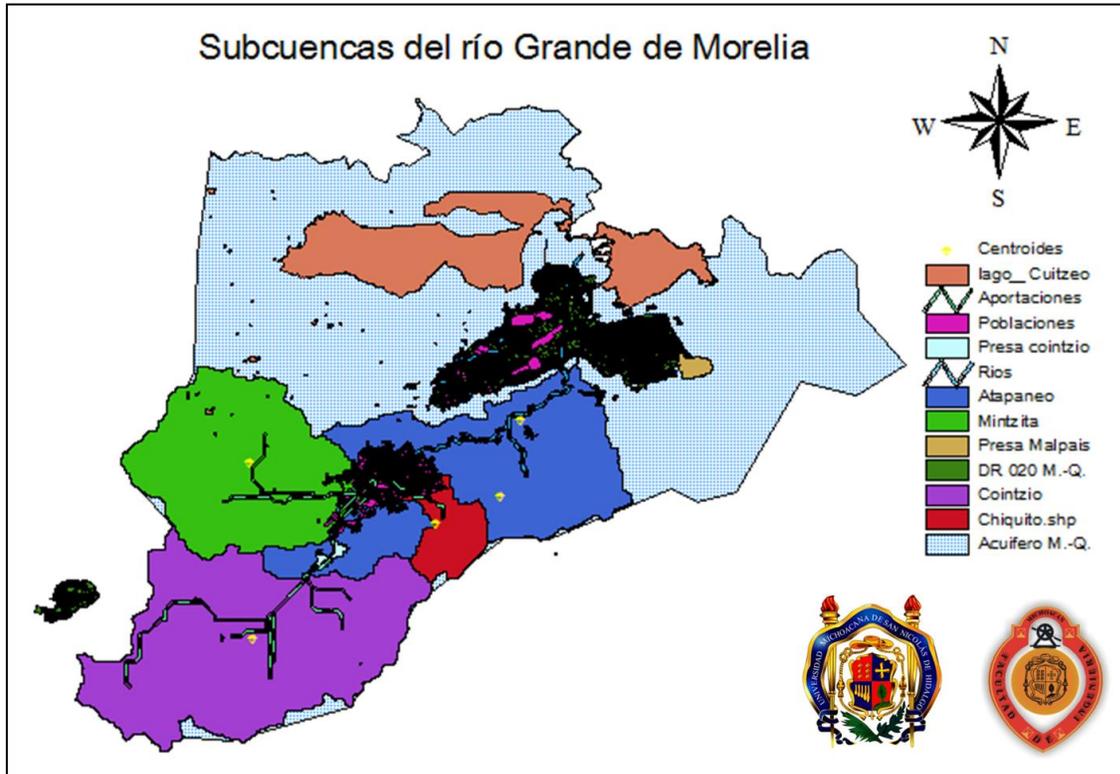


Figura 4.1 a) Ubicación de la cuenca del Río Grande de Morelia (superior) y b). División de la cuenca del río grande de Morelia, Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (inferior).

4.2 Acuífero Morelia-Queréndaro.

El acuífero Morelia-Queréndaro se ubica en la Región Hidrológica No. 12, zona B también pertenece a la Comisión de Cuenca Lago de Pátzcuaro desde 2004.

Se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26' y 20° 08' de latitud norte y los meridianos 100° 38' y 101° 29' de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 3,510 km². (Figura 4.2).

Colinda al sur con Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente con los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, en el estado de Michoacán. Al norte colinda con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo, del estado de Guanajuato, al poniente con los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro.

Geopolíticamente abarca la totalidad de los municipios de Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copandaro, Tarímbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándiro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Pátzcuaro, Huiramba y Huaniqueo.

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, y es jurisdicción territorial de la dirección local de Michoacán. Su territorio se encuentra totalmente vedado y



sujeto a las disposiciones de cuatro decretos publicados en el Diario Oficial de la Federación en los años 1956, 1964, 1975 y 1987 (CONAGUA 2009a).

En la zona que comprende el acuífero se han realizado ocho estudios, que van de los años 1977 al 2009. Algunos presentan con información hidrogeológica, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona. Los estudios realizados son los siguientes:

- Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Morelia - Queréndaro, Michoacán (SARH, 1977).
- Estudio de exploración geofísica y actividades geológicas complementarias en la zona de Morelia -Álvaro obregón, Michoacán (SARH, 1988).
- Estudio geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Michoacán. (CNA, 1990).
- Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán (CNA, 1993).
- Registros de litología, acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1995). Registros de piezometría, acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1997). Estudio geohidrológico de la zona sur-poniente de Morelia (OOAPAS, 2006).
- Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatio – Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán (IMTA 2007).
- Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), estado de Michoacán (CONAGUA 2009a).

Los resultados y conclusiones de los últimos dos estudios estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, más sin embargo se analizo toda la información que pudiera ser valiosa en los estudios antes presentados, para tener una mejor idea del funcionamiento del acuífero Morelia-Queréndaro.

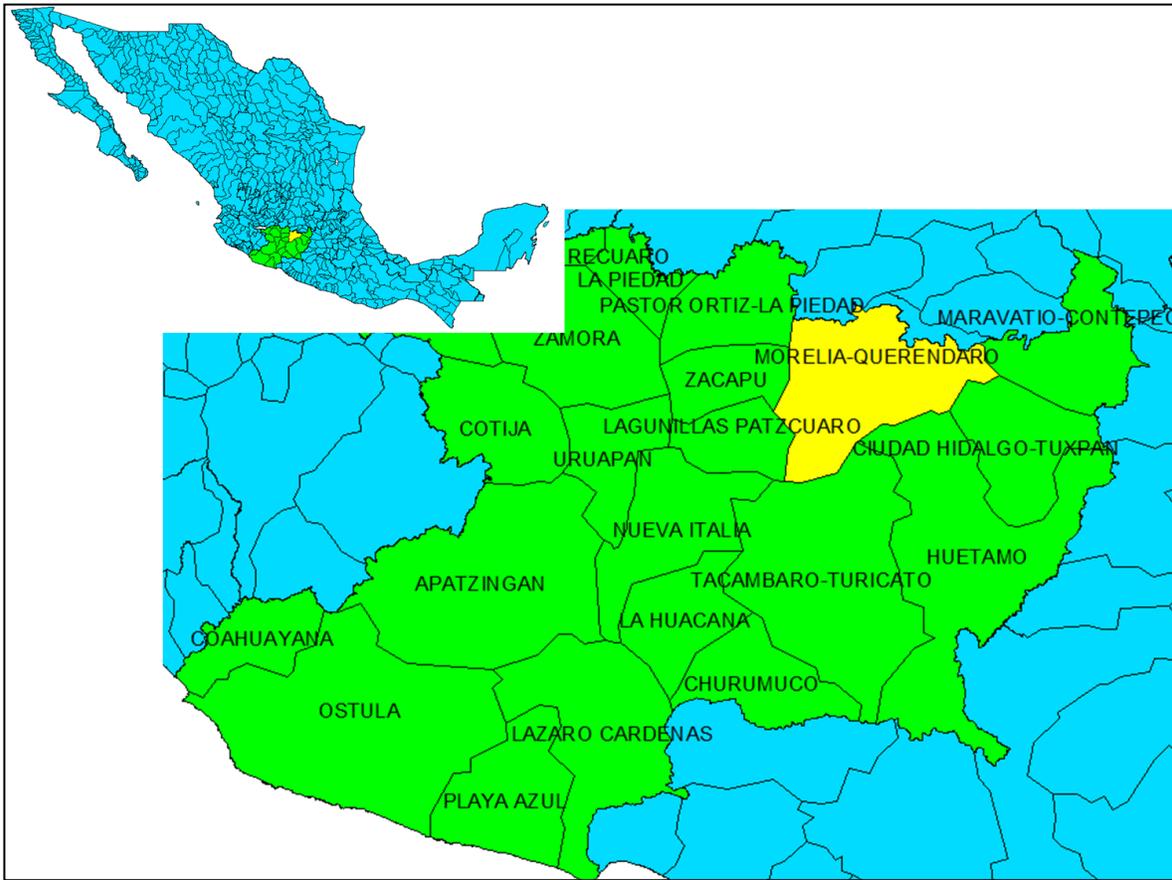


Figura 4.2 ubicación acuífero Morelia-Queréndaro.

4.2.1 Fisiografía

El acuífero Morelia-Queréndaro, según el INEGI (1991), se ubica en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, cubre parte de tres subprovincias, la Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y Mil Cumbres. El Eje Neovolcánico está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; la segunda, alcanza desarrollo significativo de sistemas de fallas asociado con manifestaciones volcánicas y grabens o fosas. El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas formando las sierras circundantes y creando paisajes de morfologías combinadas y notable singularidad.

Las subprovincias fisiográficas son tres principalmente:

- Subprovincia Neovolcánica Tarasca. Esta se caracteriza por vulcanismo reciente (Plioceno-Cuaternario) muy particular y por un gran número de aparatos volcánicos -conos cineríticos. En general, los suelos son jóvenes, se formaron de manera residual, en su mayoría lo hicieron a partir de cenizas volcánicas.
- Subprovincia de las Sierras y Bajíos Michoacanos. Los suelos de esta subprovincia son aluviales y residuales, desarrollados a partir de basaltos, brechas, tobas, andesitas y riolitas, todas ellas originadas en los periodos Paleógeno-Neógeno y Cuaternario. Entre los



tipos de suelo más importantes de la región, se puede señalar a los vertisoles, feozems, luvisoles y andosoles.

- Subprovincia de Mil Cumbres. Es una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas, como son: sierras volcánicas complejas, mesetas lávicas escalonadas, lomeríos basálticos y el valle por el cual el río Lerma se dirige al norte, hacia la presa Solís.

4.2.2 Geomorfología

El acuífero define rasgos geomorfológicos como resultado de fuerzas tectónicas y actividad volcánica muy intensas, que actuaron combinadamente y alternadamente con la erosión. Hay dos unidades morfológicas presentes en la zona: montañas y lomeríos y valles.

Las montañas y lomeríos están constituidos predominantemente por rocas ígneas extrusivas de edad terciaria, en la porción sur de la zona, las constituyen andesitas y basaltos del Paleógeno-Neógeno, sus montañas alcanzan elevaciones superiores a los 3,000 msnm, presentan un relieve muy abrupto, con frentes escarpados y fuertes pendientes.

Los valles son de origen tectónico y fluvial, actualmente están ocupados en su mayor parte por tres unidades del Distrito de Riego 020. La planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, ubicada en la porción central de la zona, se encuentra formada por las llanuras de inundación de los ríos y arroyos, que siguiendo cursos divagantes desembocan al lago de Cuitzeo.

4.2.3 Geología

La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el acuífero. Están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

Las rocas que afloran dentro de los límites del acuífero son de tipo ígneo extrusivo básica del periodo cuaternario, según INEGI 2007. La Figura 3 muestra la geología general del acuífero.

4.2.4 Estratigrafía

En el área de estudio afloran rocas de origen ígneo extrusivo y sedimentario continental. Las primeras están constituidas por los derrames de lavas, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas, cuyas composiciones varían desde ácidas hasta básicas, tales como ignimbritas, andesita y basaltos; sus edades varían desde el Mioceno inferior al Reciente. Las más antiguas son unas tobas riolíticas de edad del Mioceno Inferior, en edad les sigue unas rocas de composición andesítica del Mioceno Medio, que manifiestan ser las de mayor distribución en el área y que están cubiertas parcialmente por derrames, aglomerados y conglomerados de composición andesítica y basáltica de edad del Mioceno Superior y por ignimbritas o tobas soldadas de composición primordialmente riolítica de edad Mioceno-Plioceno.



A las anteriores rocas ignimbritas le siguen en edad emisiones volcánicas de composición andesítico-basáltica y basáltica, de edad del Plioceno. A todos los que le suceden otra serie de derrames, y edad Plioceno-Cuaternario y composición basáltica y basálto-andesítico. Finalmente se define la unidad volcánica más joven del área la cual tiene una composición basáltica y su edad es del Cuaternario al Reciente.

Las rocas de origen sedimentario continental están constituidas por sedimentos lacustres que varían en partes altas en arenas, gravas y conglomerados intercalados con tobas riolíticas y son cubiertas por los basáltos del Plioceno Superior. Los depósitos más recientes están constituidos por limos y arcillas de origen lacustre, gravas, y arenas de tipo residual y aluviales constituidos por boleos, gravas y limos mezclados en diferentes proporciones.

En la figura 4.3 se muestra la geología del acuífero, siendo las rocas predominantes las siguientes:

-  Rocas ígneas (Mioceno Inferior).
-  Derrames andesíticos (Mioceno Medio).
-  Lavas, brechas y conglomerados (Mioceno – Plioceno).
-  Ignimbritas y tobas riolíticas (Plioceno Inferior-Medio).
-  Depósitos lacustres, gravas arenas y tobas (Plioceno Superior).
-  Derrames basálticos y andesítico (Plioceno Superior).
-  Lavas, brechas y tobas basálticas (Cuaternario).
-  Lavas, escorias brechas, piroclastos y tobas (Cuaternario).
-  Gravas, arenas, limos y arcillas (Reciente).

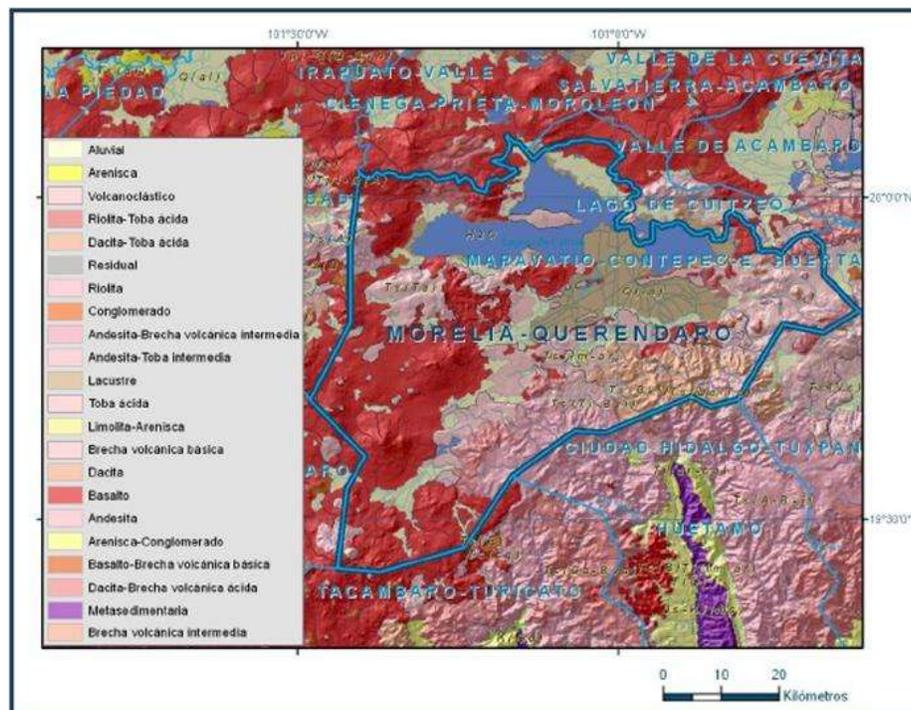


Figura 4.3 Geología del acuífero Morelia-Queréndaro fuente CONAGUA 2009.



Rocas ígneas. Está constituida por tobas, brechas y lavas ignimbríticas, de composición riolítica. En la sierra de Mil Cumbres y en el camino a Tzitzio, su espesor que va de 300 a 350 m, al este de Copándaro, es del orden de 120 m.

Derrames andesíticos. Derrames de lavas, aglomerados y brechas de composición andesítica. Las lavas se presentan en el poblado de Tarímbaro y cerca al poblado de Álvaro Obregón. Su espesor es cercano a los 400 m.

Lavas, brechas y conglomerados. Predominantemente derrames de lavas, brechas y conglomerados basales. En la porción norte el espesor es del orden de 260 m y en la barranca del arroyo Uval, de 120 m.

Ignimbritas y tobas riolíticas. En su mayoría ignimbritas o tobas soldadas, vidrios, derrames y tobas vítreas, cristalinas, arenosas y arcillosas, pumicíticas y de composición dacítica y riolítica. Espesores de cerca de 350 m. En el área del poblado de Morelos, afloran más de 150 m de tobas soldadas, sin embargo en los alrededores de la ciudad de Morelia, muestran que el espesor de las tobas arenosas y de las ignimbritas, aumentan del oriente de dicha ciudad hacia el poniente de la misma.

Depósitos lacustres y gravas, arenas y tobas. Constituida por sedimentos o depósitos, en ambientes lacustres, de constitución arcillo-arenoso, que se gradúan vertical y horizontalmente a gravas, arenas y tobas. Sus espesores pueden ser de hasta 80 m y llegar a ser mayores al oriente del área.

Derrames basálticos y andesíticos. Son derrames de lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto-andesítica, andesita-basáltica y andesítica. Predominan en la porción oriental, sus espesores son de un máximo de 25 m y en la occidental, pueden alcanzar hasta del orden de 400 m.

Lavas, brechas y tobas basálticas. Lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto andesítico y andesíticas. Sus espesores son variables, al poniente de la ciudad de Morelia es de 60 m, estos espesores deben de aumentar hacia el centro de emisión del Quinceo, probablemente hasta unos 600 m.

Lavas, escorias, brechas, piroclastos y tobas. Derrames de lavas, escorias, brechas, aglomerados, piroclastos y lapilli. Los espesores deben de ser cientos de metros, si se considera que algunos de los valles u hondonadas, donde afloran rocas de esta unidad, tienen un desnivel de más de 400 m con respecto a los afloramientos contiguos, también de rocas de esta unidad.

Gravas, arenas, limos y arcillas. Esta unidad está constituida por limos y arcillas, depositados en ambiente lacustre; gravas, arenas y arcillas de origen residual y aluviones compuestos por conglomerados; gravas, arenas, limos y arcillas. Los espesores de los residuales deben ser mayores a unos 3 m; los aluviones, pueden llegar a los 10 m, en la periferia del valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres es posible que tengan algunas decenas en el centro del valle y en el Tiripetío y Lagunillas.



4.2.5 Geología estructural

Es posible dividir a la provincia en los sectores poniente, oriente y central, basándose en la concentración de ellas y los sentidos preferenciales que muestran.

El sector poniente es afectado por sistemas de alineamientos de dirección SE-NW; en el sector oriental los alineamientos observan una dirección SW-NE, S-N y NNW-SSE; siendo afectada la porción central que es donde se ubica la zona, predominantemente por el sistema SW-NE, observándose también alineamientos de sentido E-W y NNW-SSE.

Se observa la existencia de fosas tectónicas orientadas E-W, como las que corresponden con los lagos de Chápala y Cuitzeo, así como, la zona del Bajío Guanajuatense a S-N, como las de los valles de México y Toluca.

Por otro lado, se observan alineamientos estructurales de direcciones coincidentes con los del sector central, esto es, SW-NE, E-W y SSE-NNW, en donde la mayoría de ellos corresponden a trazas de fallas normales, con sus bloques bajos hacia el norte. Los sistemas sensiblemente E-W y SW-NE, con escalonamientos hacia el N y NW propiciaron los valles de Morelia-Álvaro Obregón, el de Atapaneo-Charo y la depresión existente al SE de Morelia, entre los poblados de Buenavista-Zurumbeneo; debiéndose al sistema SW-NE la depresión en donde se asienta la ciudad de Morelia, que corresponde a un gran alineamiento sensiblemente SW-NE.

El graben es evidenciado por la abrupta terminación de los afloramientos de las unidades Miocénicas ubicadas al oriente, sur y suroriente de la Cd. de Morelia, esto es, en la porción suroriental del área, lo que equivale a conceptualizarla como el pilar tectónico oriente de él, el cual hacia el valle de Morelia-Álvaro Obregón es profundizado por el sistema de fallas que originó este valle. El pilar tectónico occidental se manifiesta al noroeste de Tarímbaro, sitio en donde afloran las rocas Miocénicas y es cubierto hacia el sur por los derrames basálticos y andesíticos de edad Plio-Cuaternaria. La fosa tectónica o el graben, quedó enmascarado por el depósito de ignimbritas o tobas soldadas y en él se definen, además del valle de Morelia, el de Tiripetío y la depresión en donde se ubica el vaso de la Presa Cointzio; que prácticamente lo cruzan del SW al NE, corresponde a los sistemas de fallas que lo formaron.

Basándose en la descripción anterior de los sistemas de fallas, es posible inferir que, el sistema más antiguo identificable es el SW-NE, el cual afectó a las rocas de edad Mio-Pliocénicas y anteriores, después de él, irrumpieron las ignimbritas o tobas soldadas y se sucedieron los restantes sistemas como el E-W y SSE-NNW, que afectan a las ignimbritas. Así mismo, la afectación de las ignimbritas por el sistema de fallas SW-NE, determina que éste se activó poco después de que éstas ocurrieron, posteriormente acontecieron los otros sistemas.

Las fallas de transurrencia, desplazamiento lateral derecho, son de los últimos sistemas en aparecer, aunque son anteriores al sistema de sentido E-W, pues aparentemente son cortadas por éste.



4.2.6 Geología del subsuelo

La geometría del acuífero está definida por la depresión tectónica originada por el sistema de fallas SW-NE, en rocas de composición basáltica y conglomerados Mio-Pliocénicos, que afloran en la barranca del Arroyo Uval. Por lo tanto, el conglomerado se considera como basamento del sistema acuífero. Sus fronteras laterales están constituidas, al oriente por el pilar tectónico que limita a la fosa, como tal lo demuestra el pozo Mil Cumbres, perforado en las faldas del Punhuato, el cual hasta una profundidad de 202 m, cortó basaltos andesíticos, aglomerados y al conglomerado basal, resultando fallido; hacia el sur-oriente de la ciudad de Morelia se está también dentro del pilar tectónico, pero el cruce de fallas del sistema E-W determinó que las rocas ignimbríticas, basálticas y posiblemente el conglomerado mismo, adquirieran alta permeabilidad; la frontera lateral poniente no está bien definida. Los espesores de este acuífero son del orden de los 300 m en el centro del acuífero, al centro-sur de 400 m.

En la planicie Álvaro Obregón-Queréndaro, las rocas que alojan al acuífero son variables, pero por lo general en su porción superior son clásticas, del tamaño de gravas y arenas, alojándose también en basaltos y tobas pumíticas, hacia las laderas de las porciones centro-norte y norcentral; hacia las laderas de la porción sur, los clásticos y lacustres suprayacen a las andesitas basálticas Miocénicas.

4.2.7 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, donde se localiza el Lago de Cuitzeo; la porción inferior está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas.

El medio granular y fracturado conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general permeabilidad media a alta y un espesor promedio de 300 a 400 m.

Las distintas unidades que conforman el acuífero muestran variaciones: al poniente está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas, cuya geometría es controlada por los sistemas de fallas W-E; hacia Álvaro Obregón y Queréndaro está conformado principalmente por sedimentos clásticos del tamaño de gravas y arenas y hacia la zona contigua al lago de Cuitzeo por sedimentos arcillosos, brechas andesíticas, basaltos así como brechas y cenizas basálticas.

De manera general las rocas presentan permeabilidades que van de medias a altas, de igual manera las transmisibilidades se encuentran en los rangos medios a altos, por lo tanto los



espesores del acuífero son relativamente grandes. El acuífero por lo tanto es capaz de captar elevados volúmenes de la precipitación.

El acuífero Morelia-Queréndaro lo podemos clasificar de la siguiente manera:

-  **Acuífero del Valle de Morelia.**-Este valle se ubica en la porción poniente de la faja de lomas y valles; su sistema acuífero está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas o ignimbritas fracturadas y alteradas, así como también en derrames basálticos y flujos piroclásticos, depósitos lacustres y tobas pumíticas. Recibe recarga principalmente horizontal de las partes altas, además de la precipitación e infiltración de la zona y de la red de canales del Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. Presenta descargas naturales por medio del manantial Mintzita y San Miguel principalmente.
-  **Acuífero de la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro.**- El acuífero de este valle es el de mayor área en la zona de estudio, tanto en extensión superficial, así como en espesor, el cual aumenta hacia el lago de Cuitzeo. Las rocas que se alojan son variables, pero por lo general en su porción superior son clásticas y del tamaño de gravas y arenas; se alojan también basáltos y tobas pumíticas, en las laderas centro y norte; en las laderas sur se encuentran los clásticos y lacustres los cuales suprayacen a las andesitas basálticas Miocénicas, lo que propicia un semiconfinamiento, al igual que en la cabecera del valle. Este acuífero tiene importantes recargas tanto de los acuíferos de la zona de Morelia, los acuíferos de la zona contigua del lago de Cuitzeo y por transferencias laterales de las zonas altas, también tiene una importante recarga por la precipitación, por los retornos de la zona urbana y por los retornos y red de canales de los Módulos 2, 3, 4 y 5 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.
-  **Acuífero en la zona contigua al lago de Cuitzeo.**- Este acuífero está formado principalmente por brechas andesíticas en la porción sur del Lago de Cuitzeo, con distribución espacial muy irregular y a lo largo de fallas, como el relleno de la fosa tectónica, de espesor variable, derrames y efusiones basálticas, así como brechas y cenizas de la misma composición que afloran al norte y noreste del Lago. Su recarga proviene de la infiltración por lluvia, constituido por las rocas volcánicas, a través del fracturamiento que presentan, el flujo escurre hacia el lago de Cuitzeo en donde ocurre la descarga natural, también presenta salidas por evapotranspiraciones donde los niveles piezométricos se encuentran a menos de 10 m de profundidad y por medio de manantiales.

4.2.8 Volumen concesionado

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2007, se registraron 986 pozos y 23 manantiales. El uso principal del agua es agrícola, el segundo lugar ocupa el público urbano y en menor medida los otros usos (figura 4.4); para este análisis se utilizaron los pozos activos. La extracción de agua subterránea de acuerdo con la estimación del censo es de 162.2 hm³/año.

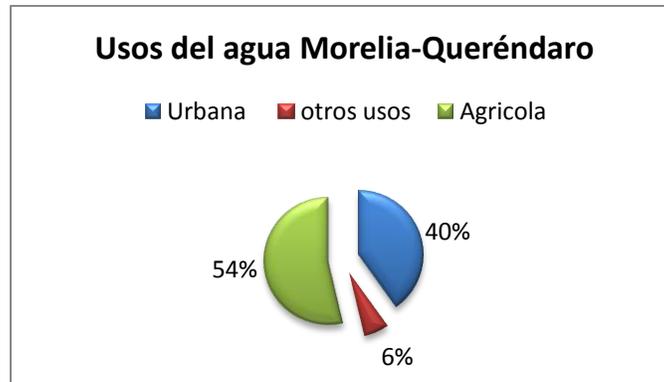


Figura 4.4 El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte 31 de marzo de 2009 es de 165 hm³/año (CONAGUA 2009).

4.3 Población de la cuenca del Río Grande de Morelia y del Acuífero Morelia-Queréndaro.

Para el presente trabajo se analizó la población total del acuífero Morelia-Queréndaro incluida la población perteneciente a la cuenca del río Grande de Morelia.

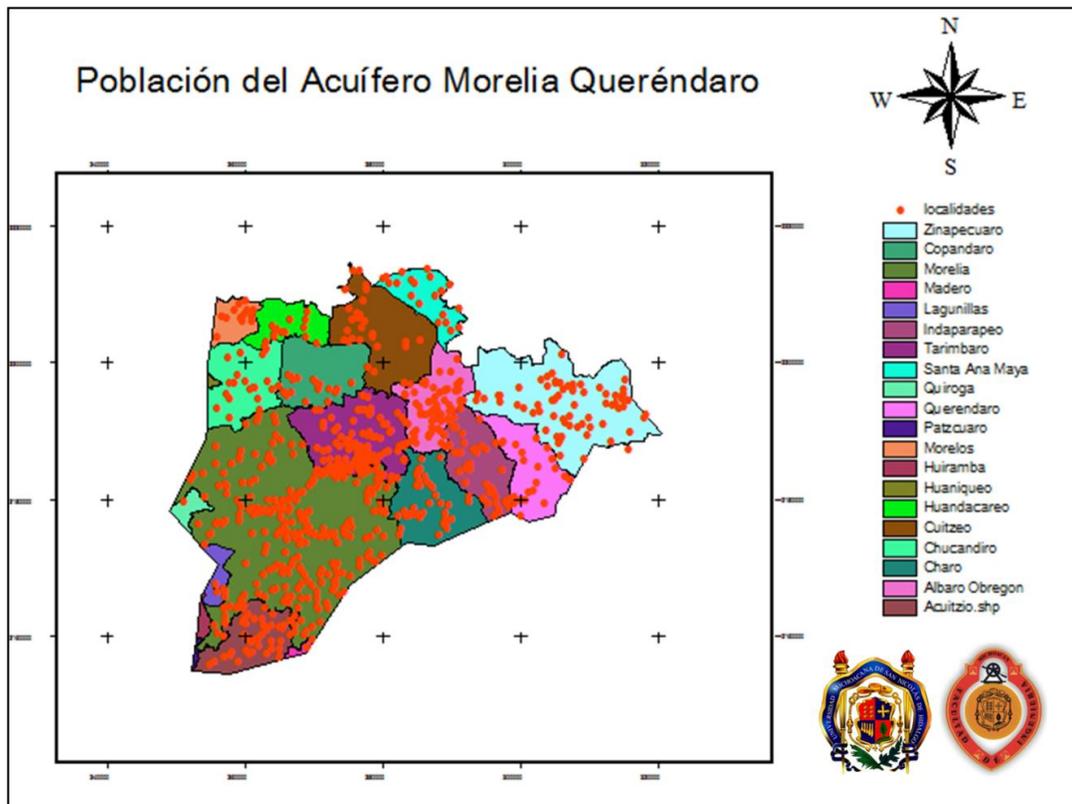


Figura 4.5 Población considerada en el acuífero Morelia-Queréndaro. Fuente INEGI 2009.



Los municipios incluidos en el estudio son los siguientes: la totalidad de los municipios Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copandaro, Tarímbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándiro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Pátzcuaro, Huiramba y Huaniqueo (figura 4.5).

Según datos del INEGI, (2010) de la población que se encuentra en el área de estudio el municipio más importante es Morelia, la cabecera municipal cuenta con 650142 habitantes para el año 2010, por su parte el municipio de Tarímbaro cuenta con 78623 habitantes, estos dos municipios son los que concentran el mayor número de población del área de estudio, el resto de los municipios se encuentran en un rango que va desde los 321 habitantes correspondientes a solo una pequeña parte del municipio de Lagunillas, hasta los 42000 habitantes para el municipio de Zinapécuaro.

La población para el acuífero en los últimos 20 años se ha incrementado de manera considerable. Para el año 1990 el acuífero Morelia-Queréndaro contaba con 668695 habitantes, incrementándose en un 13% para el año 1995, en el 2000 se incremento un 17%. Para el año 2005 la población alcanzo un 28% y finalmente para el 2010 el porcentaje que se alcanzó fue de 40% llegando así a los 937802 habitantes (figura 4.6). La población en el acuífero se está incrementando de manera importante, lo que implica un aumento en la demanda urbana, y debido a que el abastecimiento a esta demanda tiene la mayor prioridad, será de vital importancia su evolución ante el cambio climático.

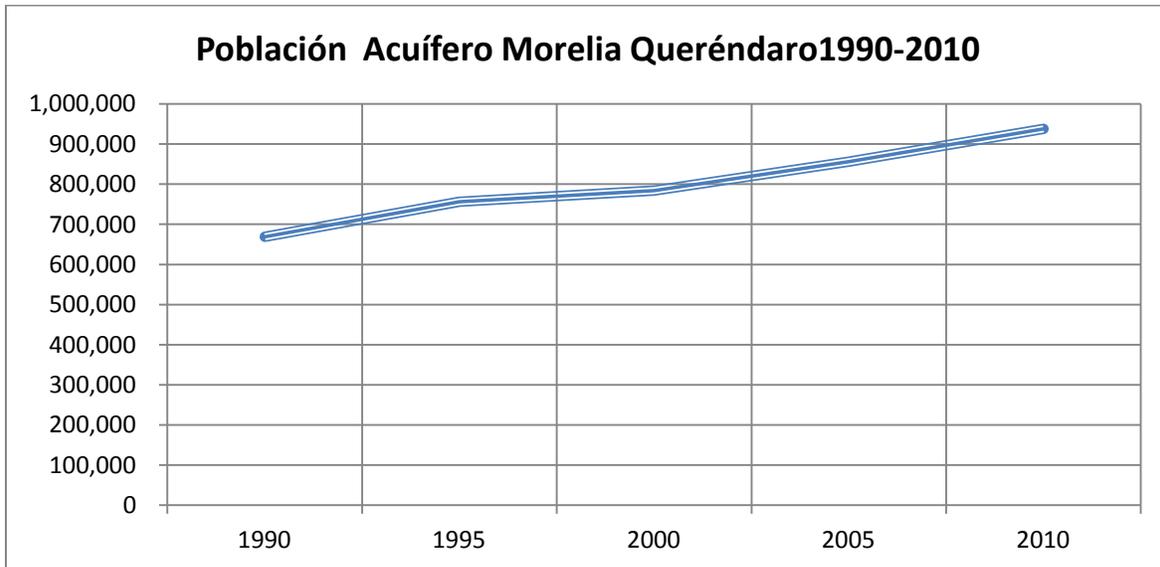


Figura 4.6 Población del Acuífero Morelia-Queréndaro para los años (1990-2010)

4.4 Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Según la FAO (2009) para el año 2050 la demanda de la población mundial (9100 millones de habitantes) supondrá una enorme presión sobre los sectores agrícola, forestal y pesquero para



suministrar alimentos, forraje y fibra, además de ingresos, empleo y otros servicios esenciales del ecosistema. Ahora bien, todos estos sectores deben responder, a su vez, al reto del cambio climático. El objetivo es por lo tanto, aumentar de forma decisiva la producción agrícola para responder así al aumento de la demanda y garantizar la seguridad alimentaria, a la vez que se mantiene la base de recursos naturales y se responde al reto del cambio climático a través de medidas de adaptación y mitigación.

En México el principal uso del agua es el agrícola, el cual se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos; esta no será suficiente para el incremento en la demanda de alimentos en un futuro. En México el área bajo riego es de 6.46 millones de hectáreas, de las cuales 3.50 corresponden a 85 Distritos de Riego, y 2.96 a más de 39 mil Unidades de Riego. Los Distritos y Unidades de Riego fueron diseñados de acuerdo con la tecnología prevaleciente para la aplicación del agua por gravedad en las parcelas. (CONAGUA 2009b).

La productividad del agua en los Distritos de Riego es un indicador clave para evaluar la eficiencia con la que se utiliza el agua para la producción de alimentos, que depende de las eficiencias de conducción del agua hasta las parcelas y la aplicación de las mismas.

El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, se encuentra ubicado en los Municipios de Álvaro Obregón, Charo, Indaparapeo, Morelia, Queréndaro, Tarímbaro y Zinapécuaro en el estado de Michoacán, y está delimitado al Sur por las tierras desecadas, colindantes con el río Grande de Morelia; al Norte, el Lago de Cuitzeo; al Este, limitado por el dren Ciénega Grande y al Oeste, limitado por el canal Joconoles.

El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro que comprende los valles de Morelia, Álvaro Obregón y Queréndaro, se encuentra localizado en la región Hidrológica No. 12 Lerma-Chápala zona B - Cuenca del Lago de Cuitzeo y Laguna de Yuriria y forman dos subcuencas menores constituidas por los Ríos Grande de Morelia y Queréndaro. Para el presente trabajo se analizara a detalle los 4 Módulos que son abastecidos por el río Grande de Morelia. Dejando de lado el Módulo 5 que es abastecido por la presa Malpaís mediante el río Queréndaro.

La superficie de los distritos de riego analizados se presenta a en la tabla 4.1 y se pueden ver las características de cada Módulo en las figuras de la 4.7 a la 4.10.

Módulos	Usuario	Superficie Física (ha)	Superficie Riego (ha)
Módulo 1	272	592.04	554.93
Módulo 2	197	218.45	218.45
Módulo 3	1,828	3,458.85	3,458.67
Módulo 4	992	1,910.02	1,906.87
Total	3289	6179.36	6138.92

Tabla 4.1 Usuarios y superficie física y de riego para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

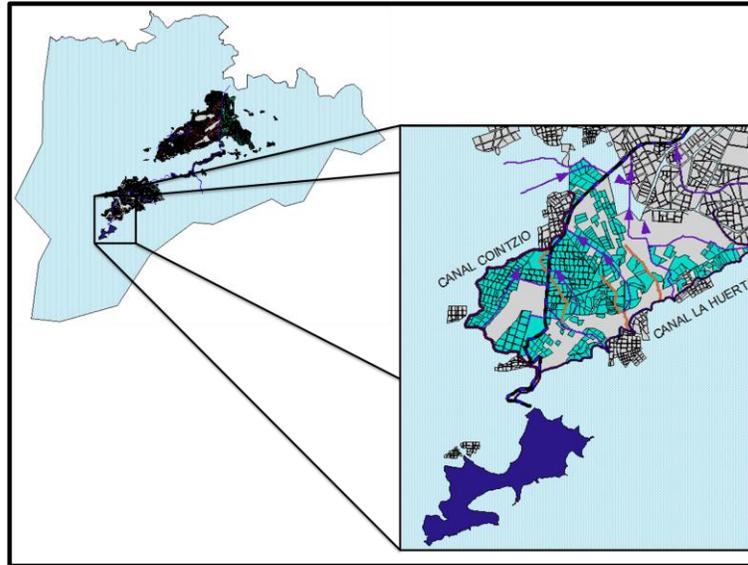


Figura 4.7 Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

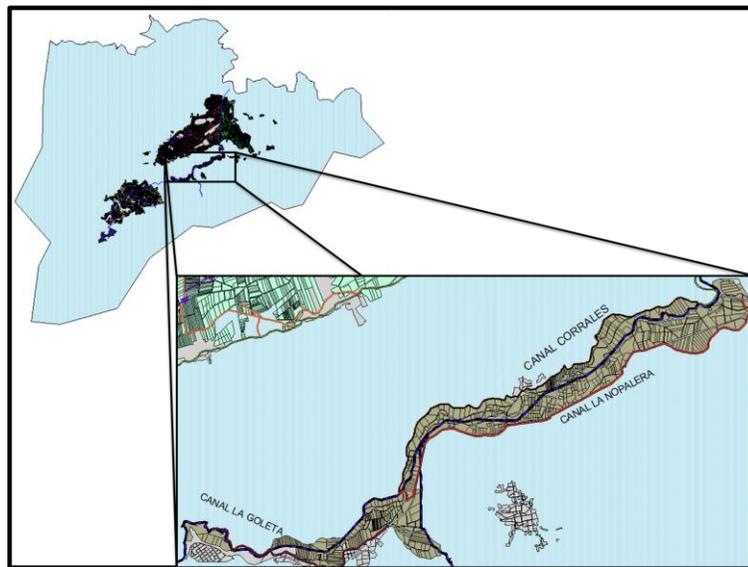


Figura 4.8 Módulo 2 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

De acuerdo a las características fisiográficas del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, se han identificado tres principales tipos de vegetación:

- **Bosque de Coníferas.**-En este tipo de vegetación se tienen: Oyamel y Pino en Charo e Indaparapeo; y Abeto y Pino en Zinapécuaro.
- **Bosque Mixto.**- Los principales tipos de vegetación que se encuentra en la zona son: Encino, Sabino y Sauce, los cuales se encuentran en Álvaro Obregón; Encino, Pino, Aile y Sauce en Charo; Pino, Encino y Aile en Indaparapeo; y Pino y Encino en Zinapécuaro.
- **Pradera.**-En este tipo de vegetación existen Nopal, Huizache y diversos matorrales.



Según la clasificación de la FAO (tabla 4.2) el Distrito de Riego se encuentra en una zona climática sub-húmeda con una precipitación entre 600-1200 mm/año. Esto hace posible la cultivación del mijo, el sorgo, el maíz, el maní, anacardos también yuca, caupí, algodón, camote, tabaco, arroz de secano, soya, mango, forrajes y pasturas. El Módulo 1 tiene una precipitación de 857 mm/año, el Módulo 2 por su parte 893 mm/año, el Módulo 3 691 mm/año y el Módulo 4 con 695 mm/año.

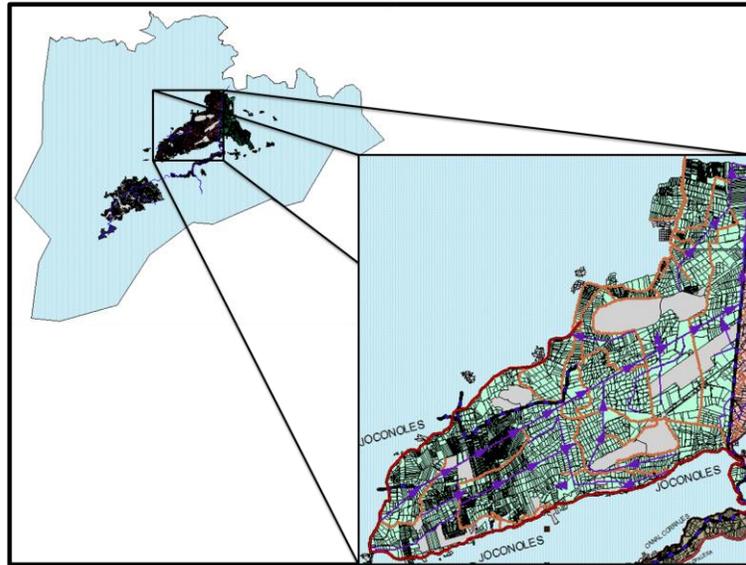


Figura 4.9 Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

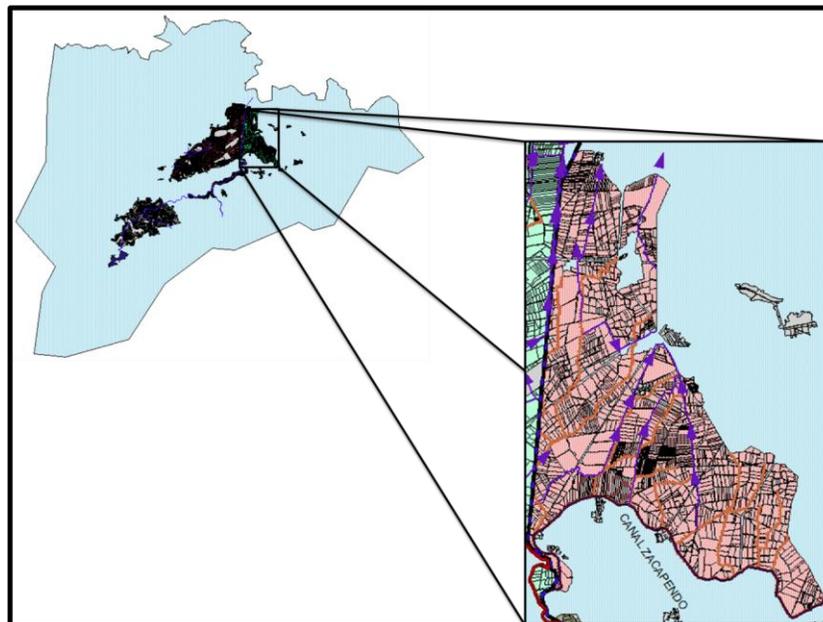


Figura 4.10 Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).



Zona climática	Las precipitaciones anuales (mm)	Período húmedo (meses)	Vegetación
Desierto	menos de 100	0-1	Poca o ninguna vegetación
Áridas	100-400	1-3	Algunos matorrales, algunos pastizales
Semi-áridas	400-600	3-4	Matorrales y arbustos, pastizales
Sub - húmedo	600-1200	4-6	Arbustos de los bosques, los pastizales
Húmedas subhúmedas	1200-1500	6-9	Bosques y tierras arboladas
Húmedo	más de 1500	9-12	Las selvas tropicales

Tabla 4.2 Zonas climáticas mundiales (FAO 2009).

4.4.1 Infraestructura hidráulica.

El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, cuenta con dos presas de almacenamiento: Cointzio y Malpaís, que se encuentra en la red mayor a cargo de la Comisión Nacional del Agua. Para el estudio se consideró solamente la presa Cointzio.

La presa de almacenamiento Cointzio, se ubica a 13 km aguas arriba de la ciudad de Morelia, tiene capacidad para almacenar 79.23 millones de m³ (CONAGUA 2009), y se conducen por el cauce del río Grande de Morelia hasta llegar al lago de Cuitzeo (figura 4.12). El volumen del embalse Cointzio en los últimos 30 años ha disminuido en comparación desde la inauguración de la presa tal como se muestra en la figura 4.11.

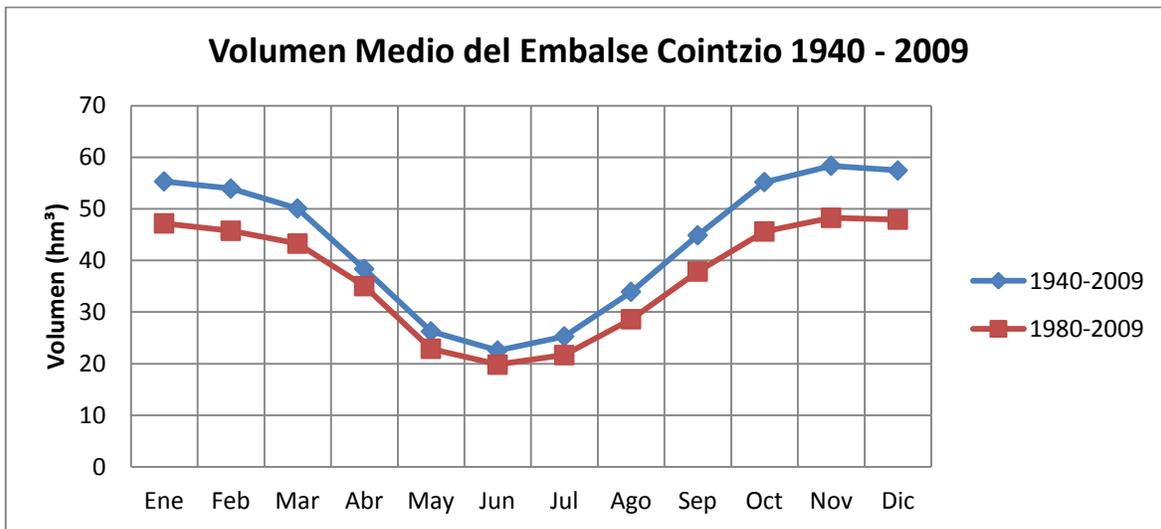


Figura 4.11 Volumen medio del embalse Cointzio para los años 1940-2009 (CONAGUA 2010)



Figura 4.12 Presa Cointzio (CONAGUA 2009b).

La presa se ha azolvado desde su apertura en 1939, por lo tanto las elevaciones, áreas y capacidades del embalse no son las mismas que hace 70 años. La tabla 4.3 muestra las elevaciones a donde se encuentra el NAMIMO, NAME, cresta vertedora, NAMO, NAME y CORONA, además de las condiciones en las que se encuentra la presa en la actualidad (CONAGUA 2009c).

Elevaciones (msnm)	Área (ha)	Capacidad (hm ³)	Nivel
1972.31	47.489	0.907	NAMINO
1975	63.098	2.39	
1978	93.478	4.751	
1981	128.027	8.068	
1984	186.37	12.853	
1987	234.047	19.15	
1990	317.453	27.315	
1995.97	463.285	50.836	Cresta vertedora
1999.47	551.287	68.52	NAMO
2001.32	604.745	79.233	NAME
2002.82	640.209	88.577	CORONA

Tabla 4.3 Elevaciones-áreas-capacidades (2009) embalse Cointzio (CONAGUA 2009c).

Las presas de derivación para el suministro de los servicios comprometidos en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro son: Cointzio y el Salto ubicadas en el Módulo 1, La Goleta y Corrales ubicadas en el Módulo 2, Quirio en el Módulo 3 y Zacapendo en el Módulo 4. (CONAGUA 2009b)



El Distrito de Riego 020 Morelia – Queréndaro cuenta con una red de conducción cuya longitud total es de 131.54 km, de los cuales únicamente 58.60 km (44.55%) se encuentran revestidos con concreto, el resto 72.94 km (55.45%) se encuentra sin revestir (tabla 4.4).

Módulo	Longitud de canales de conducción (km)
1	19.06
2	10.17
3	49.01
4	13.92
$\Sigma=$	92.16

Tabla 4.4 Longitud de canales de conducción del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

Los canales de conducción de la cuenca del río Grande se observan en la tabla 4.5, además de que se muestran los volúmenes mensuales, que en promedio anual (2005-2010) circulan por estos canales. El canal más importante es el Joconoles perteneciente al Módulo 3, debido a que transporta el mayor volumen de agua, seguido del Zacapendo que se encuentra ubicado en el Módulo 4. El canal que menos volumen conduce es la goleta perteneciente al Módulo 2.

Módulo	Módulo 1	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 2	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4
Mes/Canal	Huerta (hm ³)	Cointzio (hm ³)	Goleta (hm ³)	Corrales (hm ³)	Nopalera (hm ³)	Joconoles (hm ³)	Zacapendo (hm ³)
Octubre	0.115	0	0	0	0	0.206	0
Noviembre	0.422	0.061	0	0.03	0	1.283	0.11
Diciembre	0.55	0.079	0	0.2	0	3.778	1.042
Enero	0.548	0.098	0.049	0.024	0	5.109	3.234
Febrero	0.606	0.094	0.019	0.061	0.024	5.516	2.553
Marzo	0.751	0.123	0.125	0.39	0.28	10.234	5.12
Abril	1.229	0.294	0.345	0.649	0.537	11.75	7.246
Mayo	0.841	0.173	0.264	0.379	0.423	7.088	2.214
Junio	0.251	0.036	0.015	0.017	0.011	2.162	1.099
Julio	0	0	0	0	0	0.55	0.301
Agosto	0	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0.048
Anual $\Sigma=$	5.314	0.959	0.816	1.75	1.275	47.675	22.966
Módulo $\Sigma=$	6.272		3.841			47.675	22.966

Tabla 4.5 Suministro superficial a la demanda actual (2005-2010) para la red de conducción (CONAGUA 2009b).



Respecto a la red de distribución, el Distrito de Riego cuenta con una red de canales de distribución cuya longitud total es 186.40 km, de los cuales 45.79 km (24.57%) se encuentran revestidos, el resto, 140.61 km (75.43%) se encuentra sin revestir (tabla 4.6).

Módulo	Longitud de canales de distribución (km)			
	Laterales	Sublaterales	Ramales	Subramales
1	3.7	0	0	0
2	16.78	0	0	0
3	48.03	35.45	11.13	3.53
4	29.82	17.76	0	0
$\Sigma=$	98.33	53.21	11.13	3.53

Tabla 4.6 Longitud de canales de distribución del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

La red de drenaje del Distrito de Riego se utiliza para hacer el transporte del agua una vez que ha abastecido a los Módulos, esto ocasiona retornos al sistema principalmente en el Módulo 1, el Módulo 2 no cuenta con red de drenaje y el Módulo 3 y 4 principalmente descargan al lago, y con lo cual no implican retornos al sistema (tabla 4.7).

Módulo	Longitud de red de drenaje (km)
1	26.03
2	0
3	81.88
4	40.56
$\Sigma=$	148.47

Tabla 4.7 Longitud de red de drenaje del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009b).

De los 4 Módulos analizados, solamente dos cuentan con abastecimiento subterráneo en el cual su infraestructura hidráulica principal son los pozos para el bombeo y suministro de agua, el Módulo 3 cuenta con 77 pozos de bombeo, mientras que el Módulo 4 cuenta con solamente 7 pozos. El estado físico de los pozos se puede observar en la tabla 4.8.

Módulo	Estado Físico de los pozos		
	Bueno	Regular	Malo
3	37	23	17
4	0	0	7
$\Sigma=$	37	23	24

Tabla 4.8 Pozos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro 2010 (CONAGUA 2009).



4.4.2 Programación y suministro a la demanda

Las demandas para los Módulos de riego no son iguales, esto se debe principalmente a que año con año puede cambiar el cultivo que se está sembrando o incluso se puede sembrar un año y el siguiente no. Todos estos factores afectan la demanda de agua año con año, más sin embargo se espera que se tenga un cierto parecido año con año. En nuestro caso se realizó un promedio de los últimos 5 años para el suministro y lo programado, se observa que son muy parecidos, más como es solamente una programación, en el sentido estricto pueden variar incluso de manera importante.

El Módulo 1 es abastecido solamente superficialmente (sin bombeos). Para este Módulo se tienen las mayores diferencias entre lo suministrado y lo programado, principalmente los meses de diciembre, marzo y junio (Figura 4.13). El volumen medio anual suministrado es de 6.272 hm³ que es mayor al volumen medio anual programado que es de 6.145 hm³. El mes donde se hace la mayor entrega del recurso es en abril con 1.523 hm³.

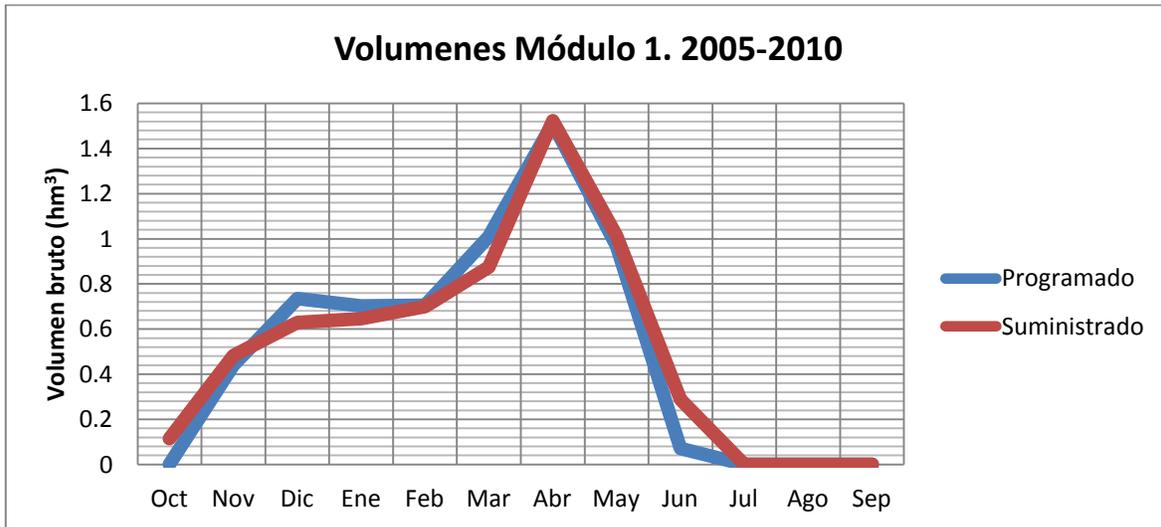


Figura 4.13 Volúmenes brutos programados y suministrados para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

El Módulo 2 es abastecido de manera superficial, el volumen bruto programado es similar al suministrado. Las diferencias mayores se dan en los meses de enero, febrero y mayo, el mes donde se hace la mayor entrega es abril con 1.53 hm³ (figura 4.14). El volumen medio anual suministrado es de 3.841 hm³ que es superior al volumen medio anual programado que es de 3.516 hm³.

En el caso del Módulo 3 se tienen variaciones mucho mayor que en los otros dos Módulos, donde se entrega mayor la cantidad del agua programada, esto no indica que el agua restante se desperdicia, sino que al observar disponibilidad del recurso en el embalse, se puede permitir que se realicen más cultivos para aprovechar el agua.

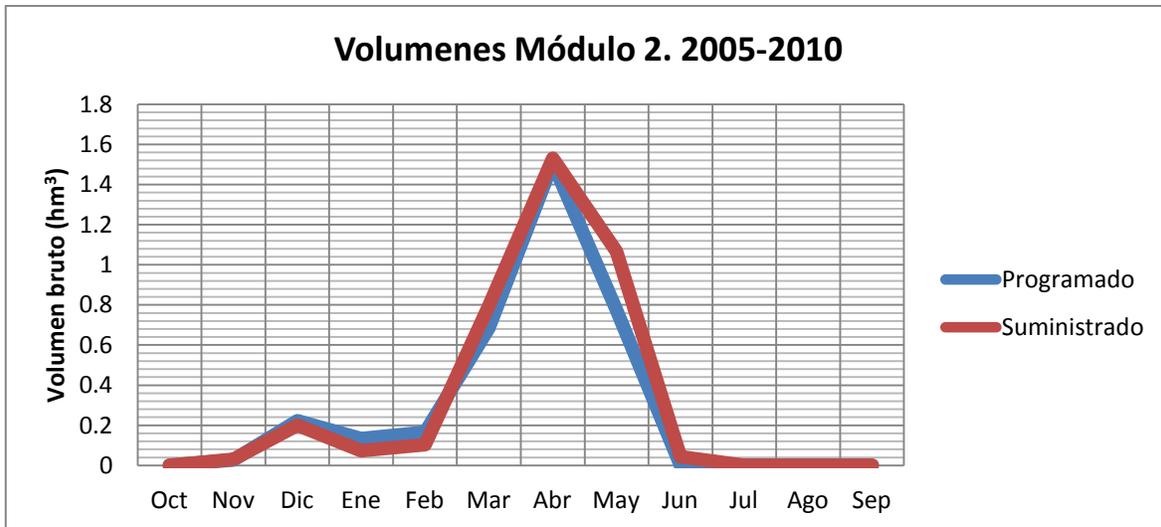


Figura 4.14 Volúmenes brutos programados y suministrados para el Módulo 2 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

Otro factor importante es que antes del Módulo 3 se incorporan las aportaciones denominadas río Chiquito y Atapaneo, además de recibir los retornos del Módulo 1, la demanda urbana de Morelia y la demanda industrial. El volumen programado medio anual es de 44.848 hm³ y el suministro medio anual a la demanda es de 47.675 hm³. Los meses con mayor diferencia son marzo, abril y mayo (figura 4.15).

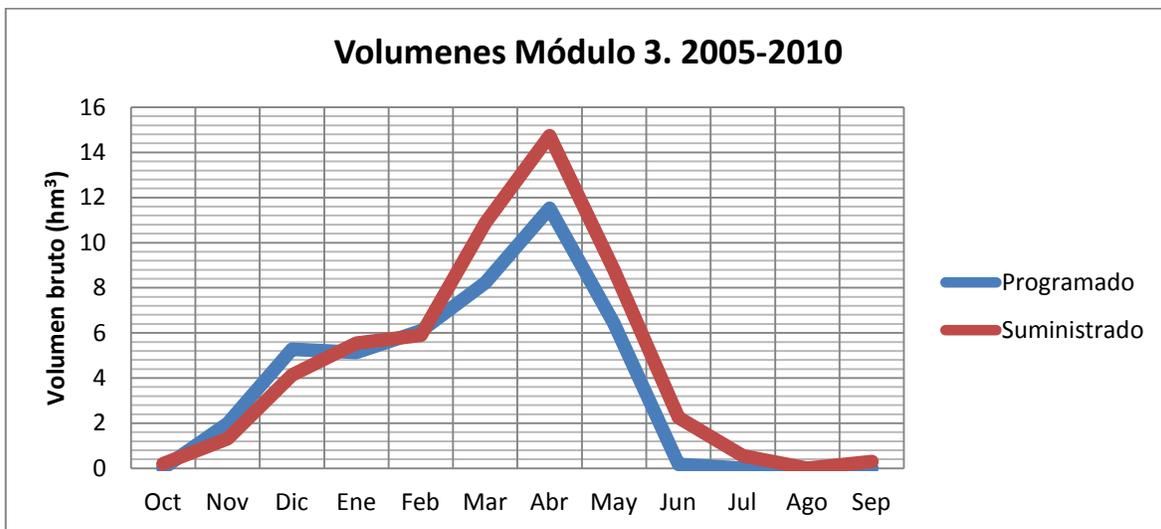


Figura 4.15 Volúmenes brutos programados y suministrados para el Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

El Módulo 4 al igual que el Módulo 3 recibe las aportaciones denominadas río Chiquito y Atapaneo, además de recibir los retornos del Módulo 1, la demanda urbana de Morelia y la demanda industrial. Esto hace que los suministros sean mayores que las demandas en la mayoría de los meses. Al igual que en los otros Módulos, en el mes de abril se entrega la mayor cantidad de



agua alcanzando los 7.246 hm³ (figura 4.16). La demanda programada media anual es de 18.876 hm³, mientras que el suministro medio anual es de 22.966 hm³.

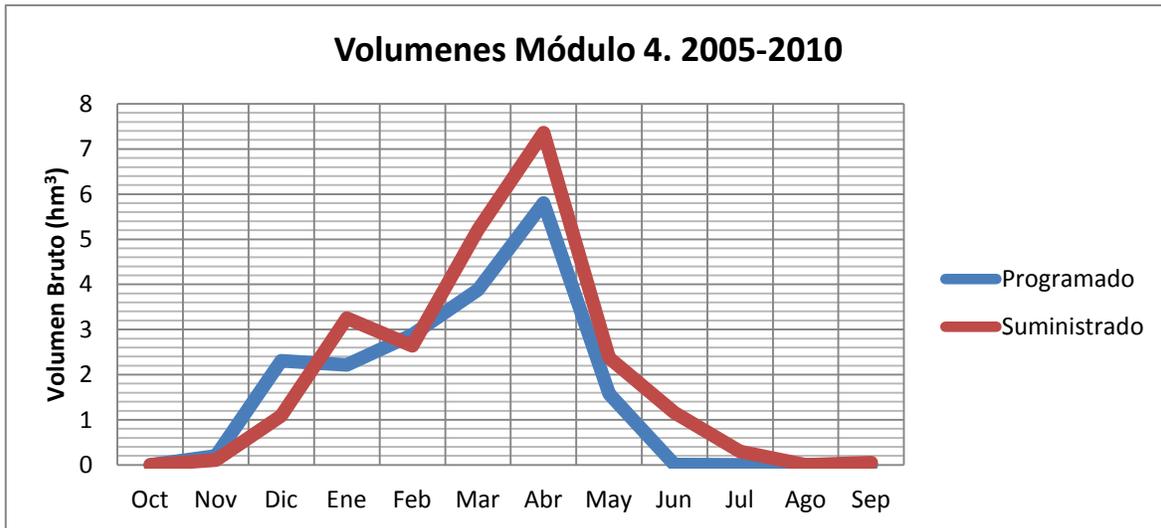


Figura 4.16 Volúmenes brutos programados y suministrados para el Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

4.4.3 Eficiencia del sistema de riego

La productividad del agua en un Distrito de Riego es un indicador clave, para evaluar la eficiencia con la que se utiliza el agua para la producción de alimentos, que depende de la eficiencia en la conducción, desde la fuente de abastecimiento hasta las parcelas y la aplicación de la misma.

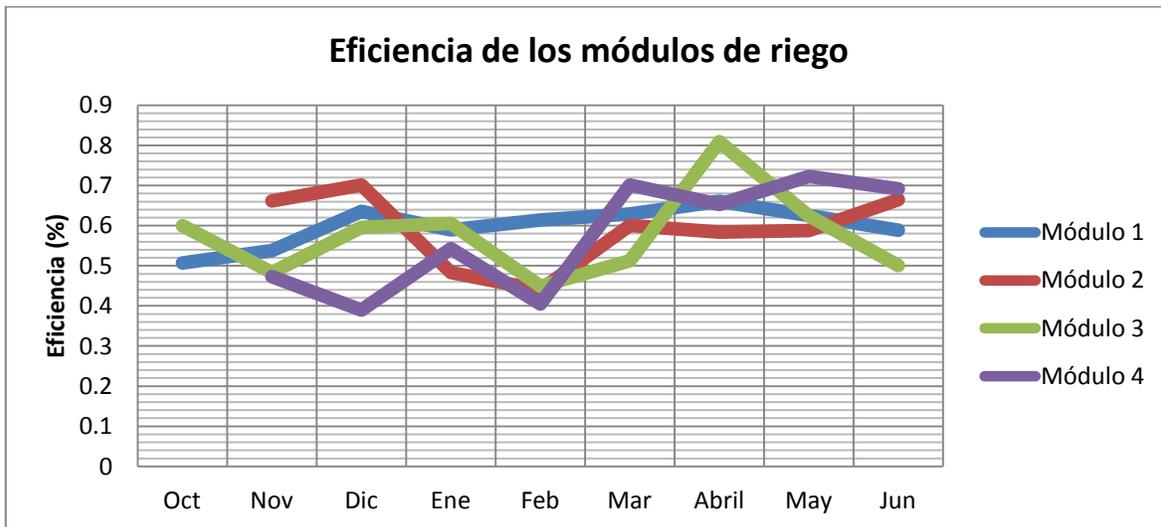


Figura 4.17 Eficiencia promedio del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro para los años 2005-2010 (CONAGUA 2009).



La eficiencia depende de diversos factores que pueden variar de manera diferente para cada mes y para cada año. Los factores principales son:

- La infiltración que se da en los canales de conducción, distribución y de drenaje.
- La evaporación, al igual que en la infiltración se presenta en los canales de conducción, distribución y de drenaje.
- Desbordamiento, sucede cuando el gasto que pasa por la conducción es mayor que del que puede transportar el canal.

Para el Distrito de Riego la eficiencia de los canales se encuentra entre el 40 y el 80% con un promedio de 58.44% para los 4 Módulos en el periodo de los últimos 5 años (Figura 4.17).

En lo concerniente al Módulo 1 la eficiencia para los últimos 5 años se encuentra en un 59.87% y se pierden en el sistema en promedio anual 2.383 hm³ (figura 4.18). De esta cantidad de agua, hay una parte que se considera recarga al acuífero, otra se pierde en el sistema.

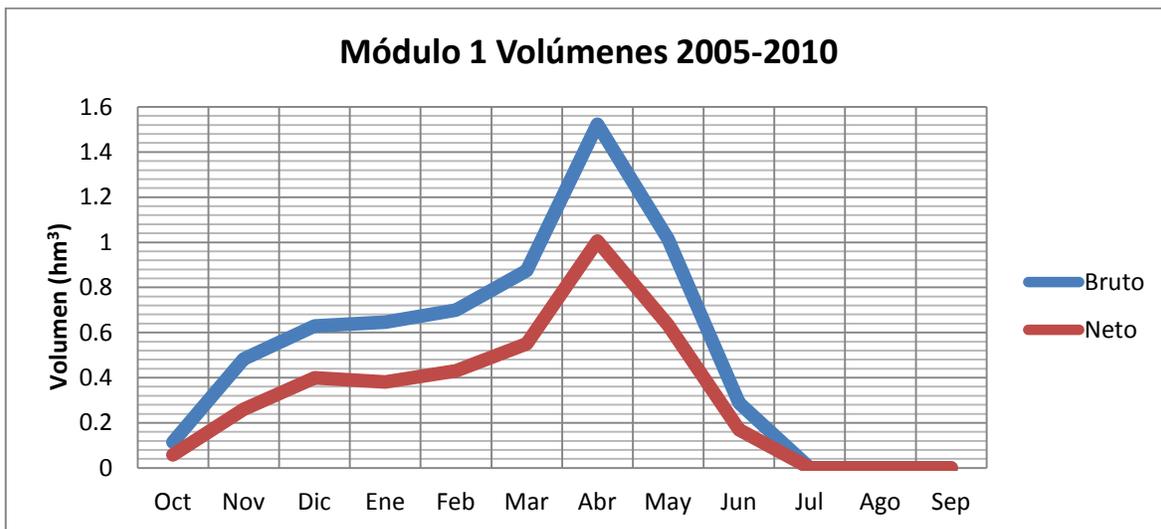


Figura 4.18 Volumen bruto y neto para el Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

El Módulo 2 pierde en promedio anual 1.574 hm³ y tiene una eficiencia promedio anual de 59.02%; los volúmenes brutos y netos promedio anuales se encuentran reflejados en la figura 4.19.

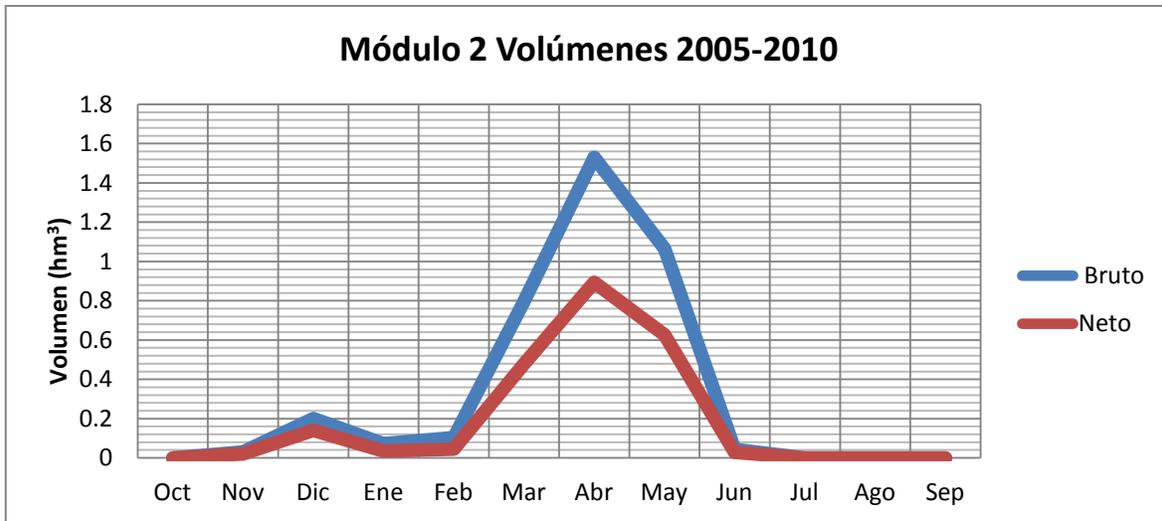


Figura 4.19 Volumen bruto y neto para el Módulo 2 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

En lo que concierne al Módulo 3 que es el de mayor área de todo el distrito de riego, el que mayor agua utiliza y también es el que más agua desperdicia con 20.154 hm³ en promedio anual y con una eficiencia de 57.57%, en la figura 4.20 podemos ver los promedios mensuales de los volúmenes brutos y netos.

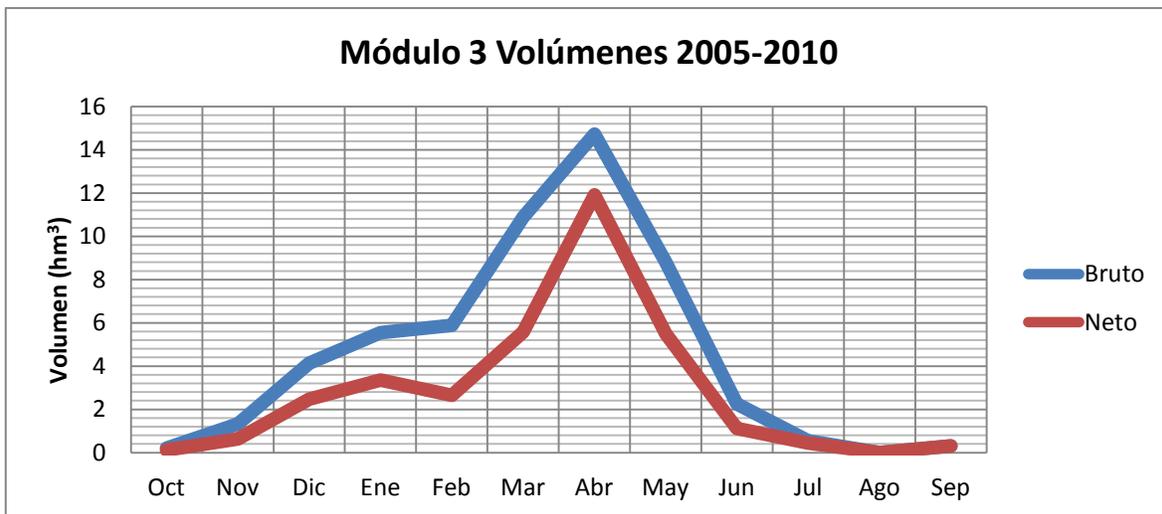


Figura 4.20 Volumen bruto y neto para el Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

En lo que concierne al Módulo 4 es el segundo que más agua desperdicia con 8.96 hm³/año y con una eficiencia en promedio anual de 57.23%. La figura 4.21 muestra la los promedios mensuales de los volúmenes brutos y netos.

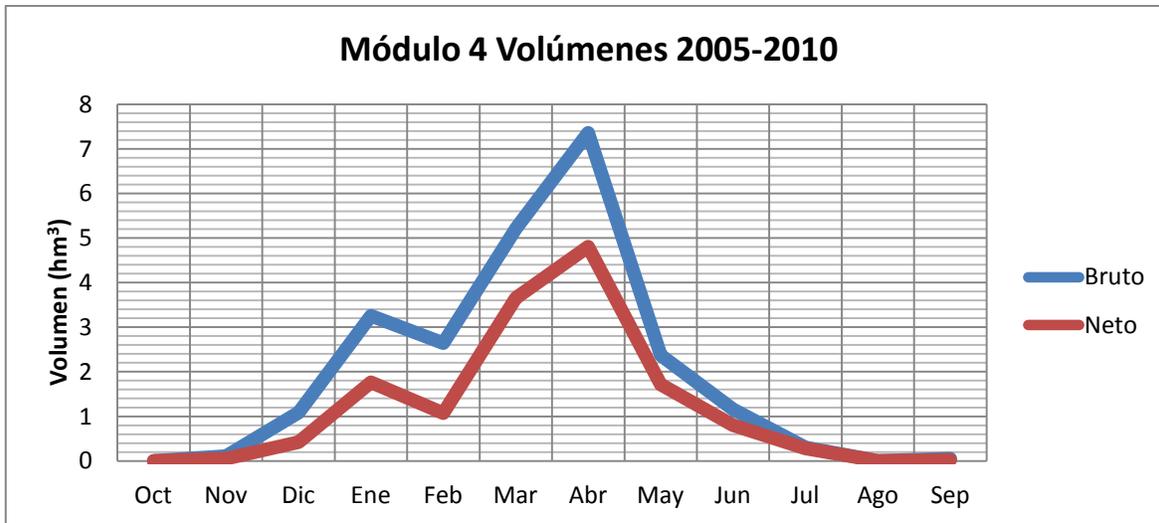


Figura 4.21 Volumen bruto y neto para el Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (CONAGUA 2009).

4.5 Planta Industrial de Celulosa y Papel de Michoacán S.A. de C.V. (CEPAMISA)

En el año 1973 se estableció la industria productora de celulosa y papel CEPAMISA ubicada en las cercanías de la Ciudad de Morelia. Debido a la actividad que realizaba y a su tecnología que utilizaría en su proceso productivo, necesitaba ubicarse en un lugar donde hubiera agua suficiente para satisfacer sus grandes requerimientos, por tal motivo se ubico en las cercanías de la ciudad de Morelia y a solo unos metros del río Grande de Morelia y del manantial la Mintzita.

La demanda de agua para uso industrial solo se utiliza para la planta industrial de Celulosa y Papel de Michoacán S.A. de C.V. (CEPAMISA). El agua utilizada para los procesos de la planta industrial es regresada al sistema del río Grande de Morelia. La demanda utilizada para la planta es de 15.5222 hm³/año (500 l/s) el gasto suministrado es constante para dicha industria.

4.5.1 Problemática de calidad del Agua.

La calidad del agua se ha visto disminuida desde la creación en 1973 de la Planta Industrial de Celulosa y Papel de Michoacán S.A. de C.V. (CEPAMISA) actualmente CRISOBA S.A. de C.V. debido a la gran cantidad de desechos industriales que se vierten en las aguas del río Grande de Morelia, lo que ocasiona un grande conflicto para los agricultores y ganaderos del Valle Morelia-Queréndaro, principalmente se han visto deterioradas las zonas de cultivo debido al riego con el agua con altos contaminantes. Por tal motivo la calidad de sus productos ha disminuido y por lo tanto se cotizan a un menor precio que si se regaran con un pozo profundo. Este conflicto ha generado disputas entre los agricultores y la industria que hasta la fecha sigue utilizando el agua del manantial la Mintzita, y por lo tanto contaminando el agua de la ciudad.



5 APLICACIÓN A LAS ZONAS DE ESTUDIO

5.1 Escenarios de cambio climático

Las variables climáticas obtenidas a partir de los diferentes escenarios corresponden a las temperaturas y de las precipitaciones para los diferentes periodos de tiempo estimados para el futuro. Los periodos de tiempo considerados en esta tesis corresponden a los periodos de 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Con los escenarios climáticos futuros se modifican las condiciones actuales y se obtienen las nuevas condiciones climáticas, para las cuales se calculan las aportaciones actuales y futuras por medio del modelo lluvia escurrimiento (Témez) paralelamente es posible calcular las demandas agrícolas para las condiciones actuales y futuras.

La ubicación de la zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Grande de Morelia y al acuífero Morelia-Queréndaro y el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, la descripción general de la zona de estudio se encuentra en el capítulo 4 de esta tesis.

Las estaciones climatológicas consideradas son 23, obtenidas de las bases datos CLICOM y CONAGUA (para los últimos años). La ubicación de las estaciones se encuentra dentro de las 3 zonas de estudio consideradas y se muestran en la figura 5.1.

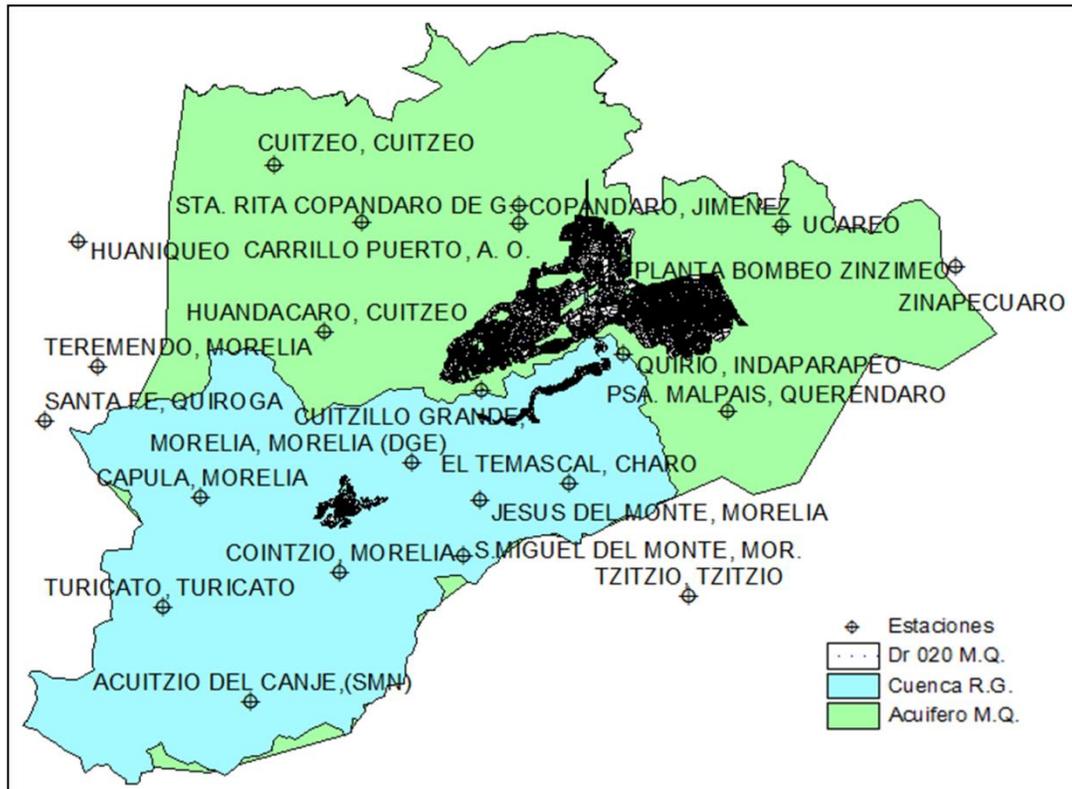


Figura 5.1 23 estaciones climatológicas completas utilizadas en las zonas de estudio.



De las estaciones climáticas se obtuvieron los siguientes datos:

-  Temperatura mínima (°C)
-  Temperatura máxima (°C)
-  Temperatura media (°C)
-  Precipitación mensual (mm/mes)

Los registros de los datos climáticos del documento de la base de datos CLICOM (2010) corresponden al periodo de 1975 a 2006, la información contenida en esta base de datos es de orden mensual y corresponde a cada una de las variables climáticas para el periodo antes mencionado. Para los años restantes se obtuvo a partir de datos proporcionados por la CONAGUA (2011).

A partir de estos datos se tiene una precipitación media anual de 815.337 mm/año para todo el acuífero Morelia-Queréndaro (figura 5.2), donde se tienen variaciones respecto a cada Módulo y subcuenca establecida en el área de estudio.

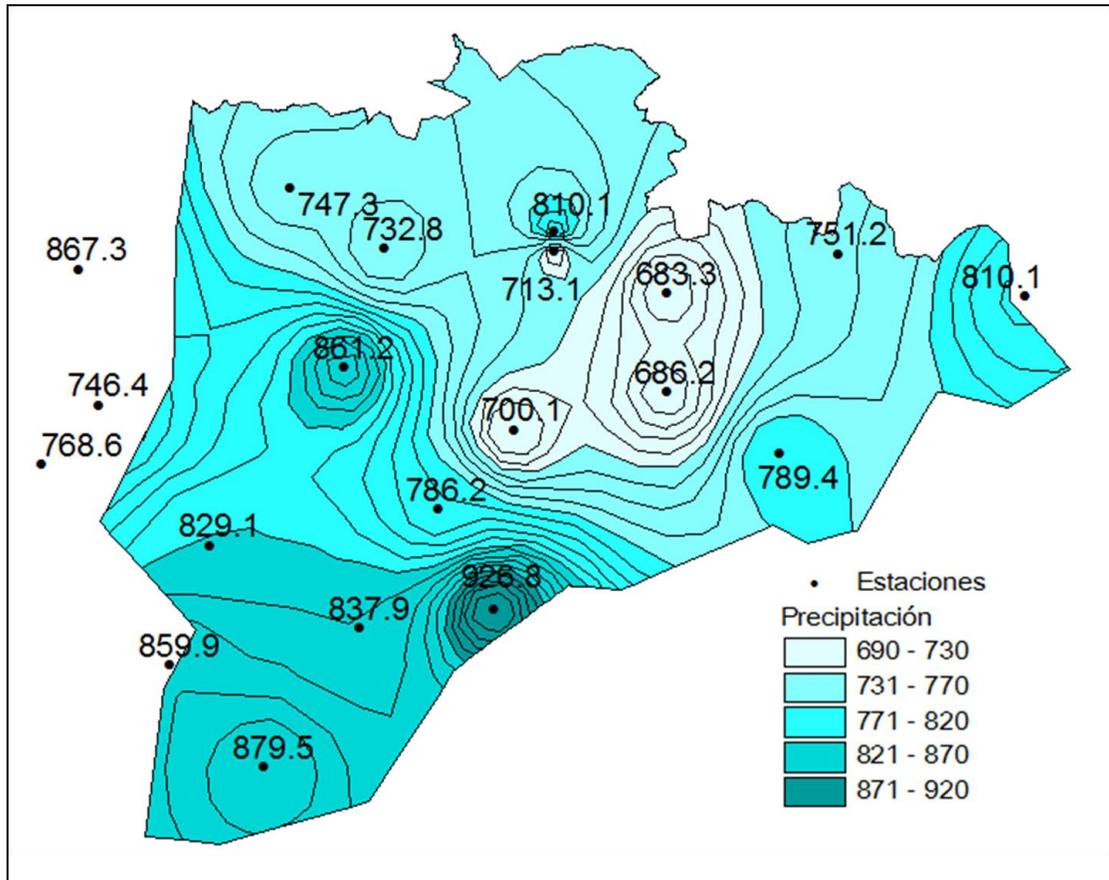


Figura 5.2 Precipitación promedio anual (mm/año) para las diferentes zonas de estudio (1975-2010).

La temperatura promedio anual del acuífero Morelia-Queréndaro es de 17.417°C, donde su variación espacial se encuentra en la figura 5.3, para el acuífero Morelia-Queréndaro.

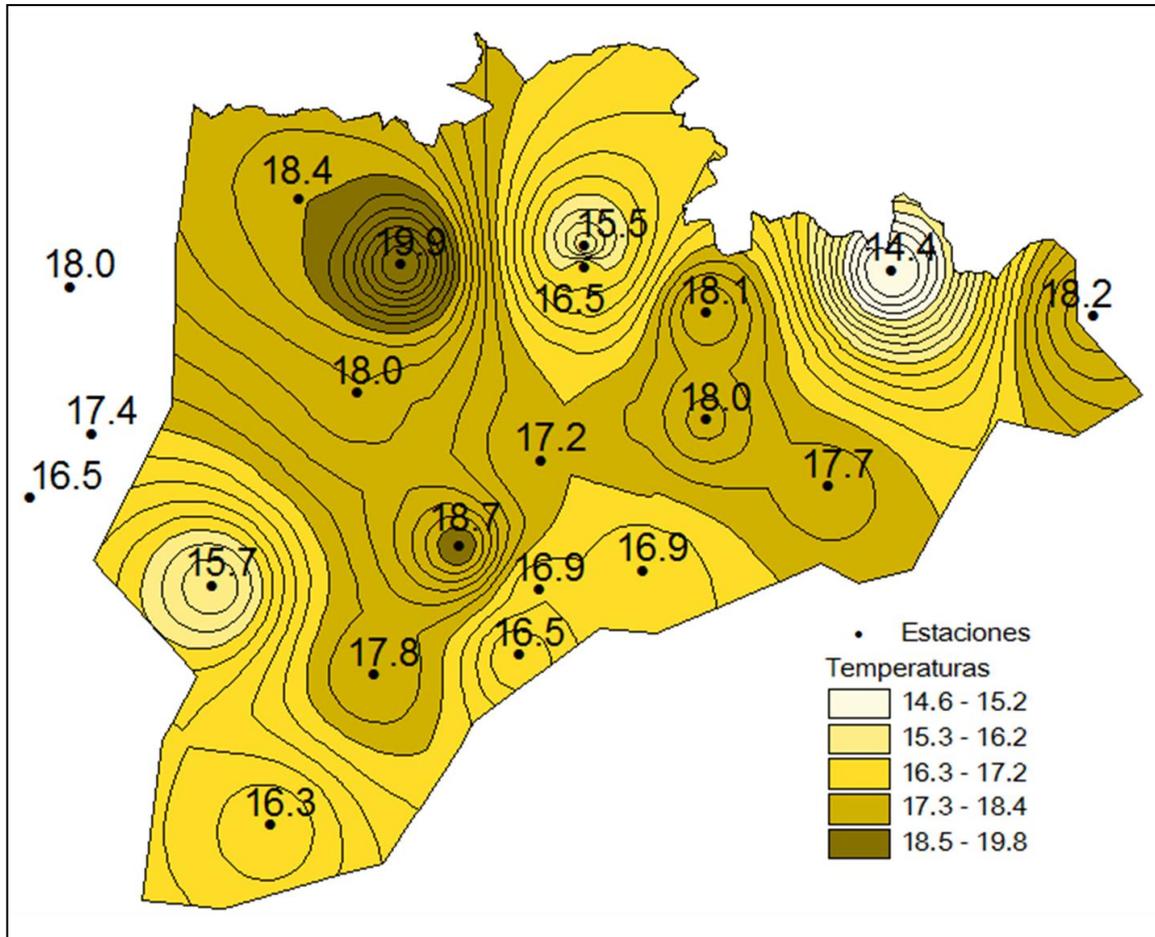


Figura 5.3 Temperatura media promedio anual (°C) para las diferentes zonas de estudio (1975-2010).

Los valores de las variables climáticas de cada año medio, para cada una de las estaciones y los mapas promedios mensuales de las temperaturas y precipitaciones correspondientes al periodo de 1975 a 2010 se encuentran en el **anexo A** de la presente tesis. Los datos climáticos del año base, son los que se consideran de referencia (situación actual), para calcular y obtener las estimaciones de los recursos hídricos.

5.1.1 Selección de escenarios.

Los escenarios climáticos utilizados han sido los regionales, para tener una mejor calidad en los resultados, los escenarios utilizados son algunos de los que se encuentran disponibles para México. Los escenarios de cambio climático disponibles para la zona de estudio son los suficientes como para hacer un análisis previo de la selección de los mismos. Los escenarios climáticos regionales utilizados en esta tesis fueron los proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología (INE), donde se realizó la reducción de escala mediante la Herramienta de Predicibilidad del Clima (CPT) del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad (IRI) de Estados Unidos.



Los Modelos de Circulación General Atmosfera Océano Atmosfera (MCGAO-A) regionalizados parten los resultados del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), en su Cuarto Informe de Evaluación (AR4, 2007).

El INE (2007) presenta de más de 20 MCGAO-A usados por el IPCC, con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos de escenarios de cambio climático regionalizados para México, considerando escenarios de emisiones de GEI (A2, A1B, B1, COMMITED) con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC en el AR4. El escenario COMMITED se refiere a la suposición de mantener constantes las concentraciones de los GEI del año 2000.

Los escenarios disponibles presentan cambios mensuales para la precipitación en % y para la temperatura en °C, para el periodo 2000 a 2099. Las estaciones de cambio climático establecidas para México regionalizadas se encuentran a una distancia aproximada de 50 km distribuidos en una malla regular.

Para la cuenca del Río Grande de Morelia, El Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro y el acuífero Morelia-Queréndaro se cuenta 8 estaciones de cambio climático (figura 5.4), es decir donde se generaron los escenarios climáticos futuros y los que serán objeto del presente estudio.

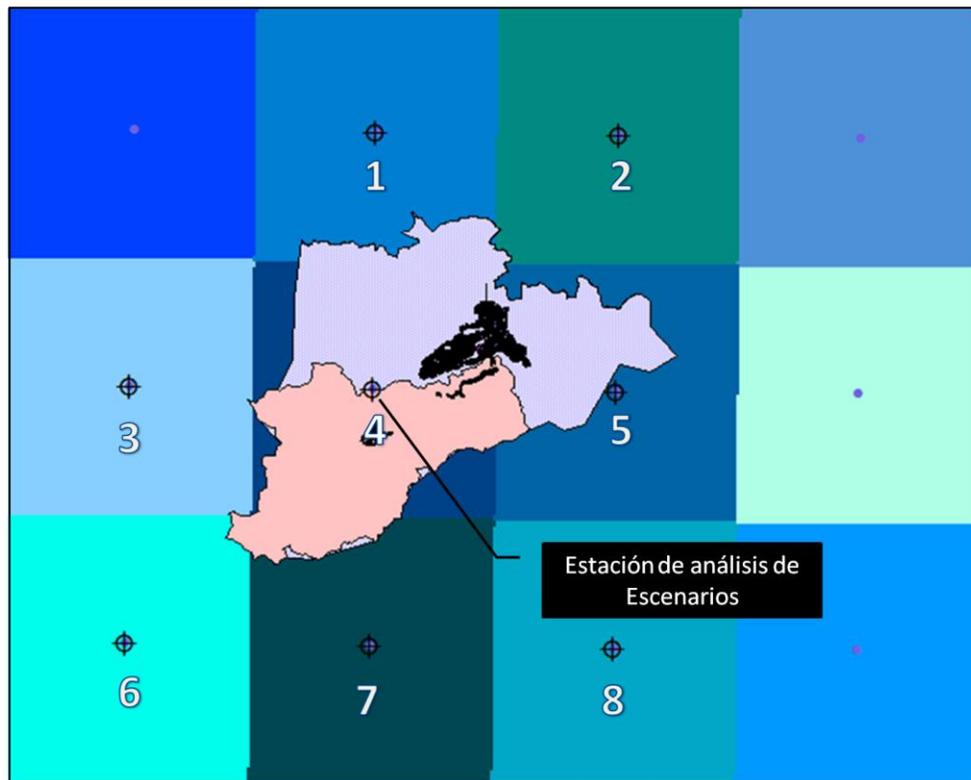


Figura 5.4 Ubicación de las estaciones de cambio climático para las diferentes zonas de estudio (INE 2007).



Los resultados obtenidos para la zona en estudio no son estrictamente precisos, más bien se tiene una probabilidad de la ocurrencia del fenómeno. Dado que el futuro del clima dependerá de cómo sean las emisiones de gases de efecto invernadero globales y en consecuencia de la magnitud del forzante radiativo. Se tiene que pensar más que pronósticos del clima futuro, se harán proyecciones o escenarios de cambio climático. Hay dos fuentes importantes de incertidumbre ante el cambio climático: las incertidumbres en las emisiones futuras, que afectan el forzamiento radiativo del sistema climático y la incertidumbre en la sensibilidad global del clima y los cambios de patrones de circulación a escala regional que simulan los modelos del clima.

Se han analizado todos los resultados de cambio climático regionales para la estación 4, la cual se denominó como “estación de análisis” que es la estación que tiene mayor peso en toda el área de estudio y donde se tienen los resultados para los escenarios que se van a trabajar los cuales son: el escenario A2, que refiere a las condiciones más críticas de cambio climático, el escenario B1 establece los cambios climáticos mínimos y el escenario A1B que presenta condiciones intermedias de cambio climático, es decir de mayor impacto que las condiciones del escenario B1 y de menor impacto que el escenario A2 (ver capítulo 2.4.2).

Para el análisis se establecieron periodos de 30 años ya que se considera que en este periodo de tiempo se alcanza una mayor confianza de ocurrencia de los fenómenos e impactos de cambio climático, además de que los escenarios de cambio regionales se realizaron para este mismo periodo de tiempo (INE 2007), para calibración 20 años y 10 años para la validación. Por tales motivos se proponen los siguientes escenarios y climatologías para la temperatura media mensual y para la precipitación total:

-  Escenario actual (1980-2009)
-  A2 2010-2039
-  A2 2040-2069
-  A2 2070-2099
-  A1b 2010-2039
-  A1b 2040-2069
-  A1b 2070-2099
-  B1 2010-2039
-  B1 2040-2069
-  B1 2070-2099

Los modelos disponibles para la realización se encuentran en la tabla 2.4. Para el presente trabajo se realizó un análisis de los modelos disponibles y de la posibilidad de ocurrencia de los mismos. Cuando se tiene la disponibilidad de varios experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes, se puede realizar un promedio de los mismos generando a lo que se conoce como un ensamble multimodelo que permita conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima en base del análisis de dónde se encuentre la mayor parte de las soluciones.



El objetivo de proyectar el clima por ensambles multimodelo es proporcionar una mayor confiabilidad de ocurrencia de los estados futuros del clima. Esto nos permite estimar en nuestro sistema de recursos hídricos, qué puede suceder y cuáles son las varias alternativas que el usuario tiene para la gestión de los recursos.

El modelo ensamble es el promedio de diez de los escenarios generados que tienen un mejor comportamiento y se estima la dispersión entre ellos como una medida de la incertidumbre.

En la figura 5.5 se muestran a manera de ejemplo en la estación de análisis (4) los modelos para el escenario A2 de la temperatura y la figura 5.6 para la precipitación, este escenario corresponde los cambios más drásticos tanto en la temperatura como en la precipitación. Se aprecia en ambas figuras que la dispersión entre los escenarios es grande, más sin embargo para la temperatura los modelos presentan la misma tendencia; para la precipitación se tienen importantes dispersiones, donde se estiman incrementos y decrementos en la precipitación, esto se debe a que la precipitación es más difícil de proyectar debido a los procesos más complejos y por lo tanto cada modelo realiza sus propias hipótesis que no necesariamente tienen que ser validas para la zona de estudio. Los resultados completos se encuentran en el **anexo B**.

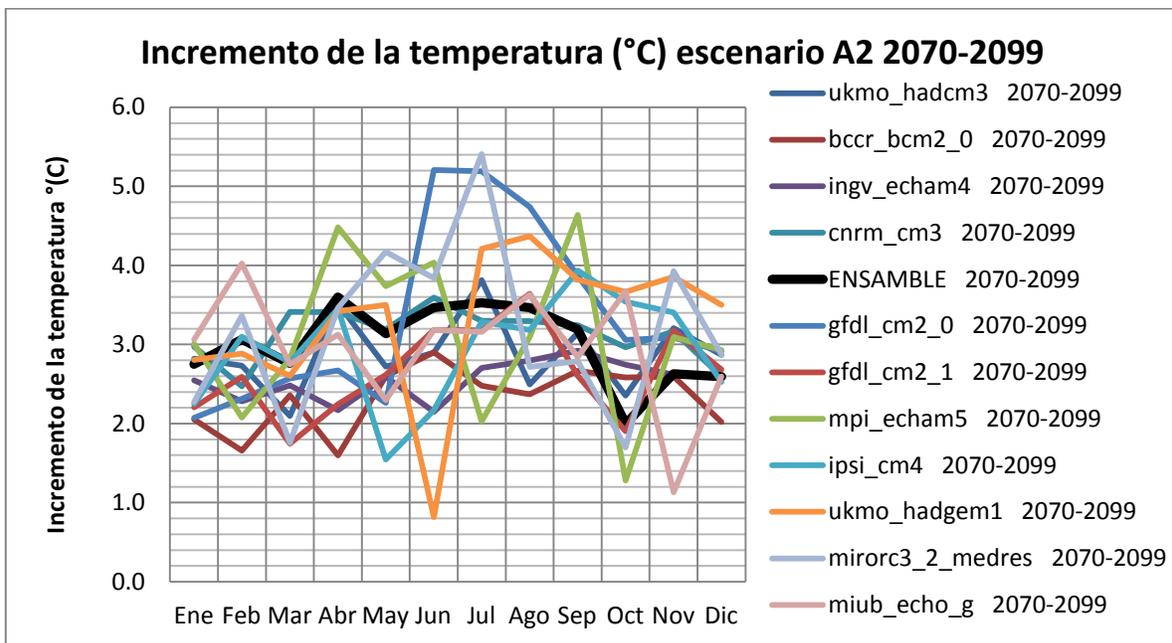


Figura 5.5 Diferentes modelos para la proyección de la temperatura correspondiente al escenario A2 2070-2099.

Los resultados del ensamble multimodelo muestran mensualmente la variación de la temperatura y precipitación, donde podemos observar el incremento de la temperatura en °C para el presente trabajo se decidió clasificar en:



- Meses cálidos (MC).- Son los meses que tienen una temperatura media mensual menor que 18°C. Los meses más cálidos para el área de estudio corresponde a los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.
- Meses fríos (MF).- Corresponde a los meses donde se tiene una temperatura mayor igual que 18°C. Para el área de estudio los meses más fríos son octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

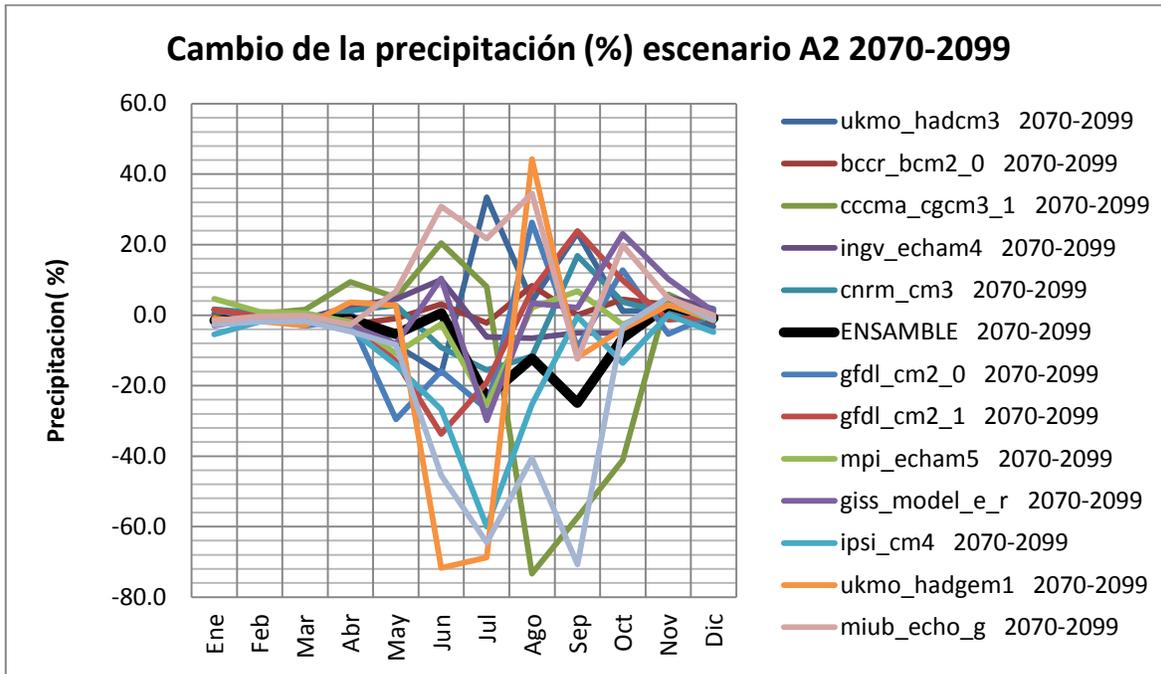


Figura 5.6 Diferentes modelos para la proyección de la precipitación correspondiente al escenario A2 2070-2099.

La variación de la precipitación en %. Como la precipitación varía en el tiempo se decidió hacer una clasificación para poder interpretar mejor los resultados de cambio climático. A continuación se describe:

- Meses con poca o nula lluvia (MPLL).- Son los meses que tienen menos de 35 mm/mes de lluvia. Para nuestro caso corresponde a los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril.
- Meses Lluviosos (MLL).- Conciernen a los meses en los que hay una precipitación mayor que 35 mm/mes. Para la zona de estudio los meses lluviosos son mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre.

En base a esta clasificación se hace el análisis de los escenarios de cambio climático que a continuación se presentan:

1. **Escenario A2 2010-2039** (figuras 5.7 y 5.8). En este escenario se proyectan cambios importantes en la precipitación, para los MPPL se tienen cambios tanto positivos y negativos



en un rango de -2.10 a 1.85%, como en estos meses no es tan importante la precipitación los cambios son relativamente pequeños. Para los MLL se tienen cambios considerables positivos y negativos, el rango se establece entre -30.08 a 11.08%. En estos meses obviamente cambios pequeños en la precipitación pueden ser un indicador importante de cambios en los escurrimientos.

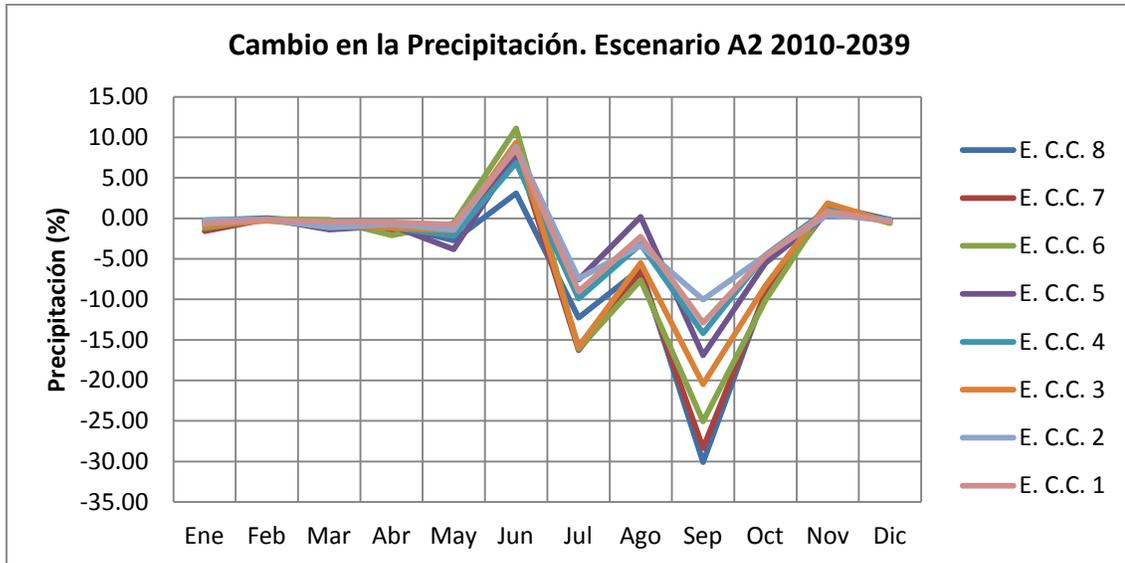


Figura 5.7 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2010-2039.

La temperatura según este escenario se comienza a observar cambios que se proyectan con un rango de 0.54 a 1.13 observándose los mayores incrementos en los meses más cálidos (MC). En promedio hay un incremento para la zona de estudio de 0.87 grados.

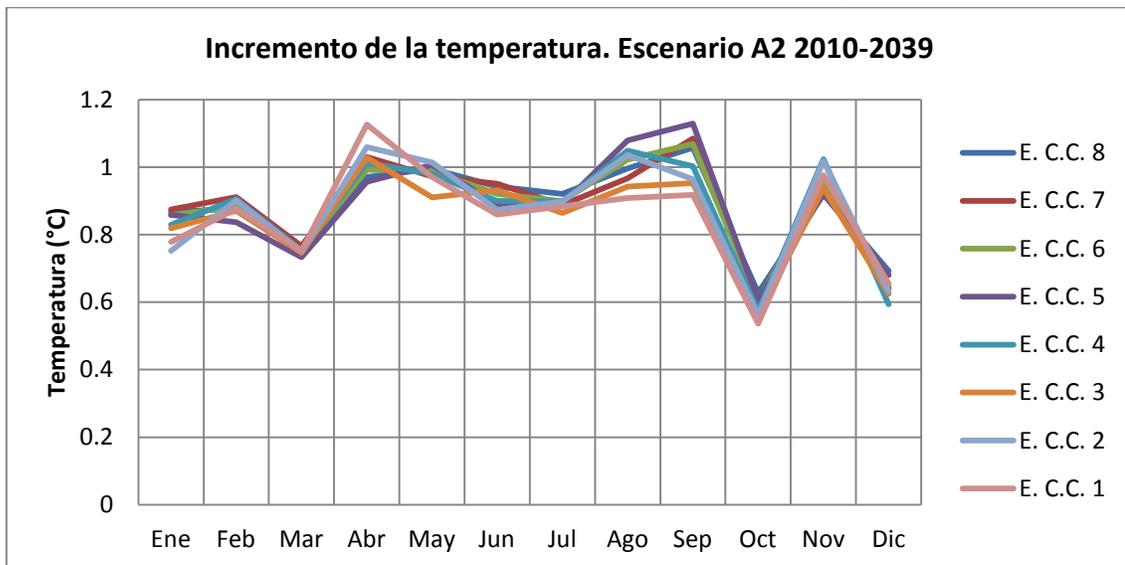


Figura 5.8 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2010-2039.



2. **Escenario A2 2040-2069** (figuras 5.9 y 5.10). La precipitación para los MPLL tiene cambios de -1.78% como mínimo lo cual no es importante. Para los MLL se tienen decrementos de hasta un 42.13% e incrementos de 11.08%.

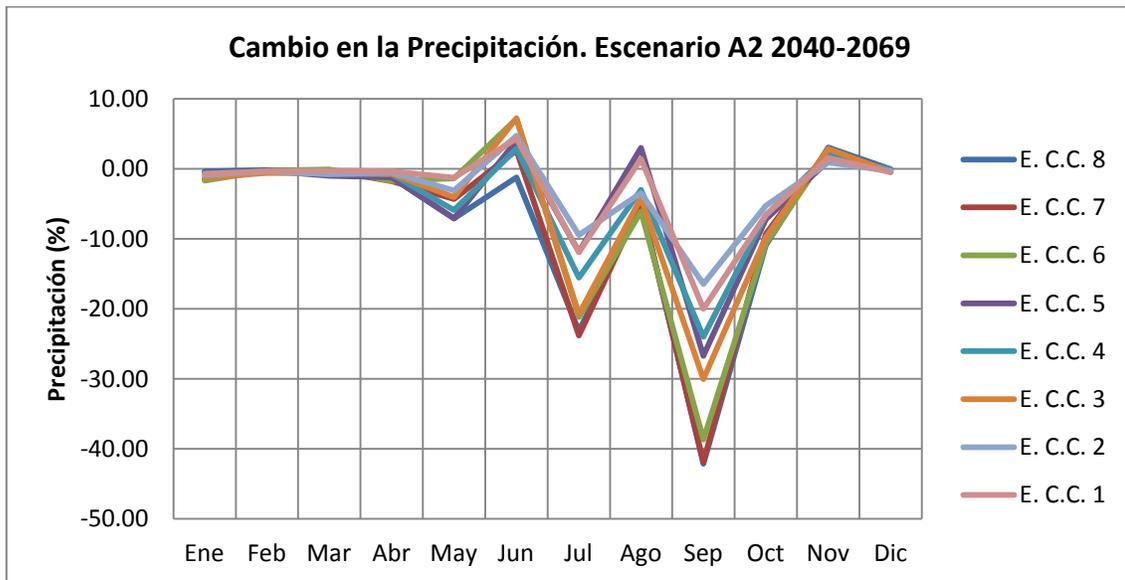


Figura 5.9 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2040-2069.

Las temperaturas en promedio crecen el doble que en escenario anterior, con incrementos mínimos de 1.08°C y un máximo de hasta 2.29°C y un promedio de 1.73 °C. Los mayores incrementos son mayores en la totalidad de los meses más cálidos (MC) y los menores incrementos de temperatura ocurren en los meses más fríos (MF).

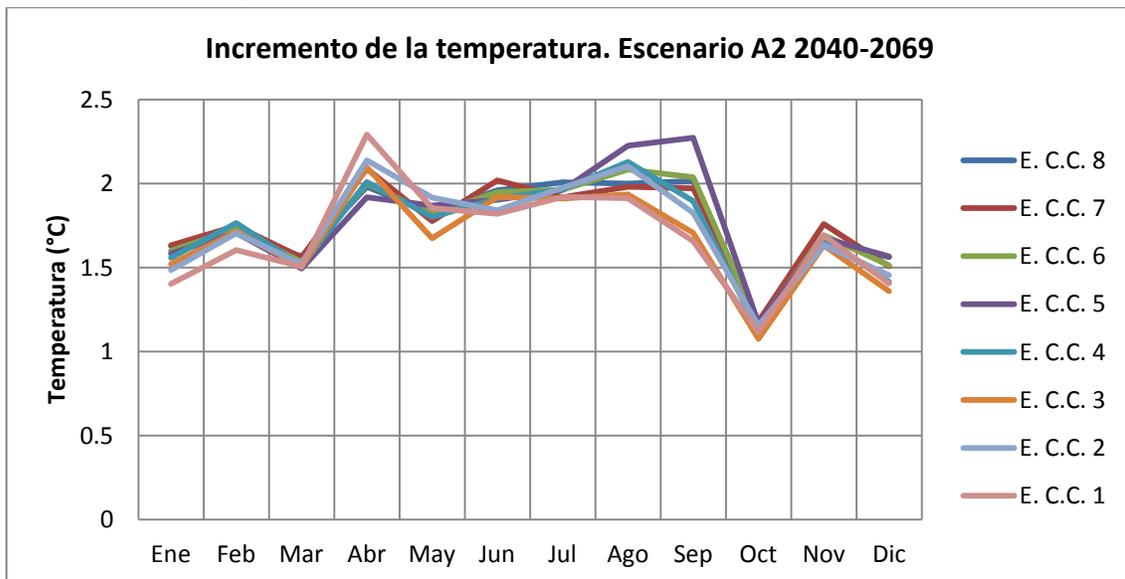


Figura 5.10 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2040-2069.



3. **Escenario A2 2070-2099** (figuras 5.11 y 5.12). Las precipitaciones en los MLL siguen el patrón de los otros dos escenarios alcanzando decrementos de -44.83% e incrementos de 4.36%. En los MPLL en promedio se reduce la precipitación en un -0.35%.

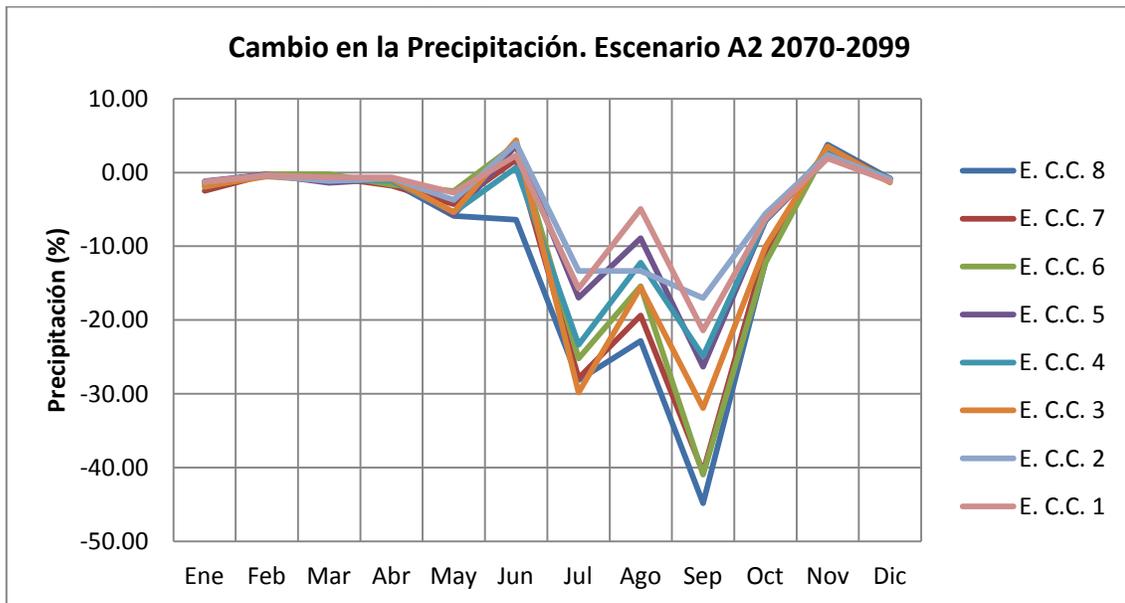


Figura 5.11 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2070-2099.

Igual que en los otros dos escenarios se tienen mayores incrementos en la temperatura en los MC incrementándose 1.25°C en promedio con respecto al escenario anterior.

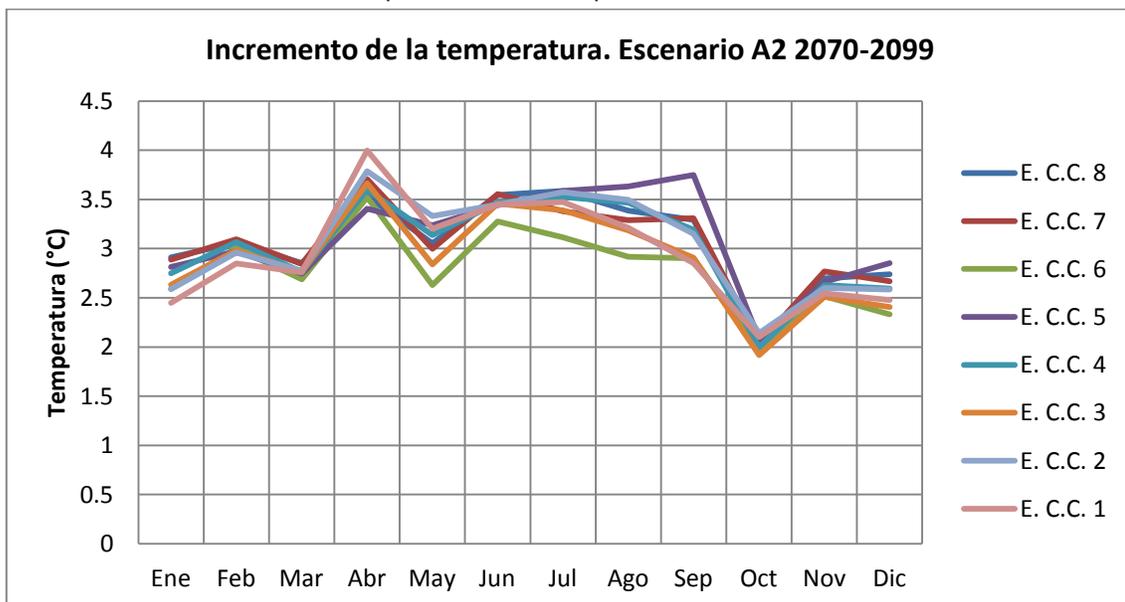


Figura 5.12 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A2 2070-2099.



4. **Escenario A1B 2010-2039** (figuras 5.13 y 5.14). En este escenario vemos un comportamiento diferente a la familia de los escenarios A2 donde se ve una alteración en el ciclo hidrológico y se incrementaría la precipitación para el mes de junio y agosto y una reducción los otros MLL. Los incrementos alcanzan 14.47% y la reducción en un -21.05% los meses que no son lluviosos tienen ligeros incrementos, en promedio 0.28%.

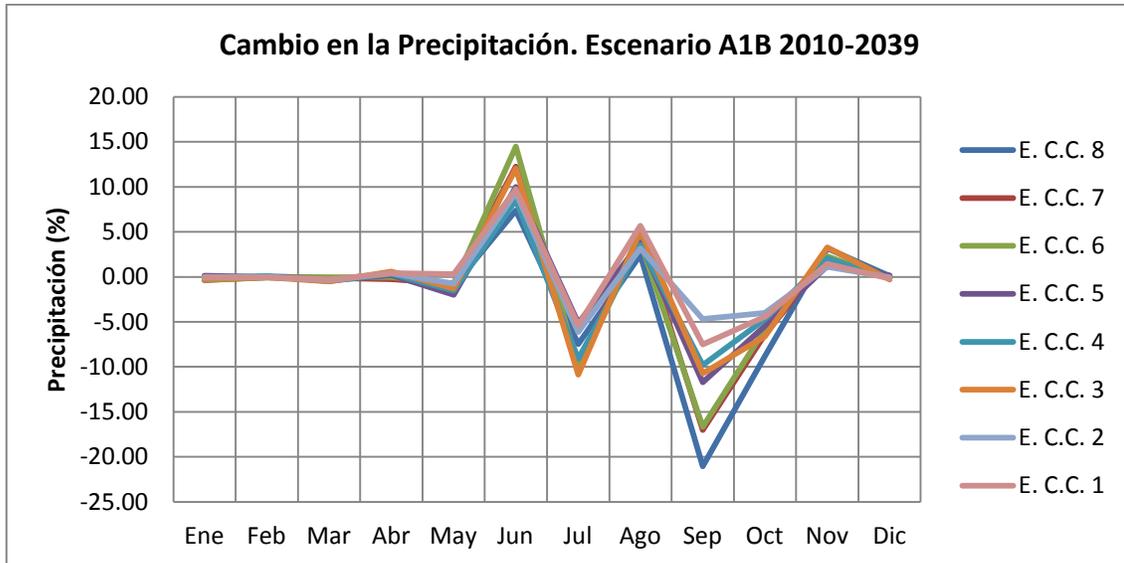


Figura 5.13 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2010-2039.

La temperatura también evoluciona de manera diferente a la familia de los escenarios A2, tiene mayores fluctuaciones y en promedio es ligeramente mayor al escenario A2 2010-2039 con un 0.93 °C. La mayoría de los MC son los que siguen teniendo un incremento mayor de la temperatura alcanzando 1.18 °C como máximo.

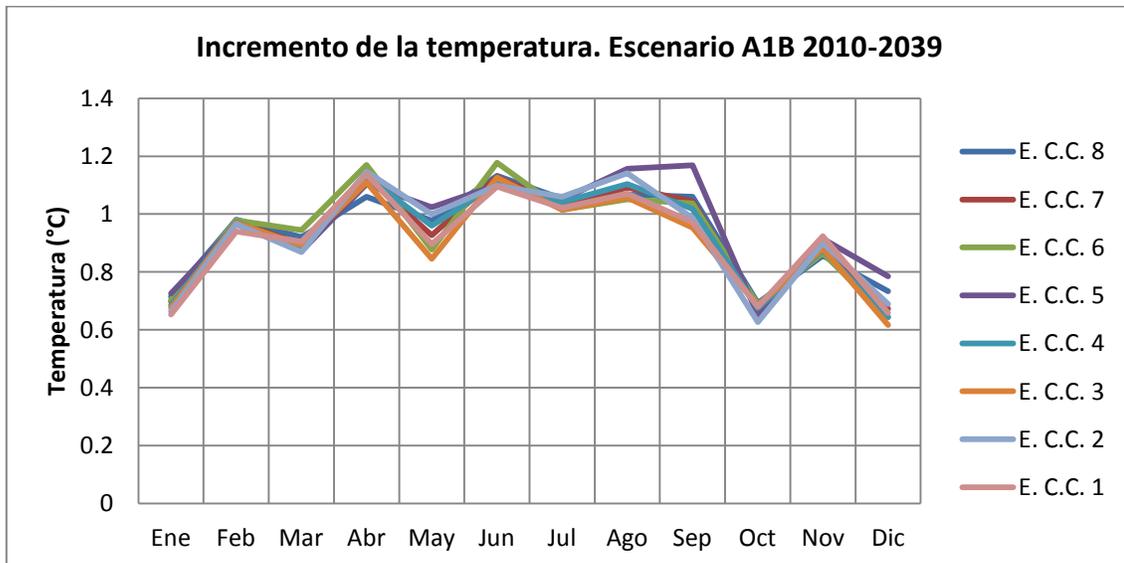


Figura 5.14 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2010-2039.



5. **Escenario A1B 2040-2069** (figuras 5.15 y 5.16). Las fluctuaciones para este escenario se siguen incrementando para los meses de junio y de agosto lo cual puede ocasionar lluvias de mayor intensidad aunque en los demás MLL se sigan teniendo disminuciones importantes. Los incrementos alcanzan 18.48% y una reducción máxima de -25.04%. Para los MPLL en este escenario en particular es 0% lo cual indica que los cambios positivos y los negativos son iguales; esto no indica que no haya cambios porque no es la misma precipitación en estos meses, pero siguen siendo meses que no presentan cambios importantes.

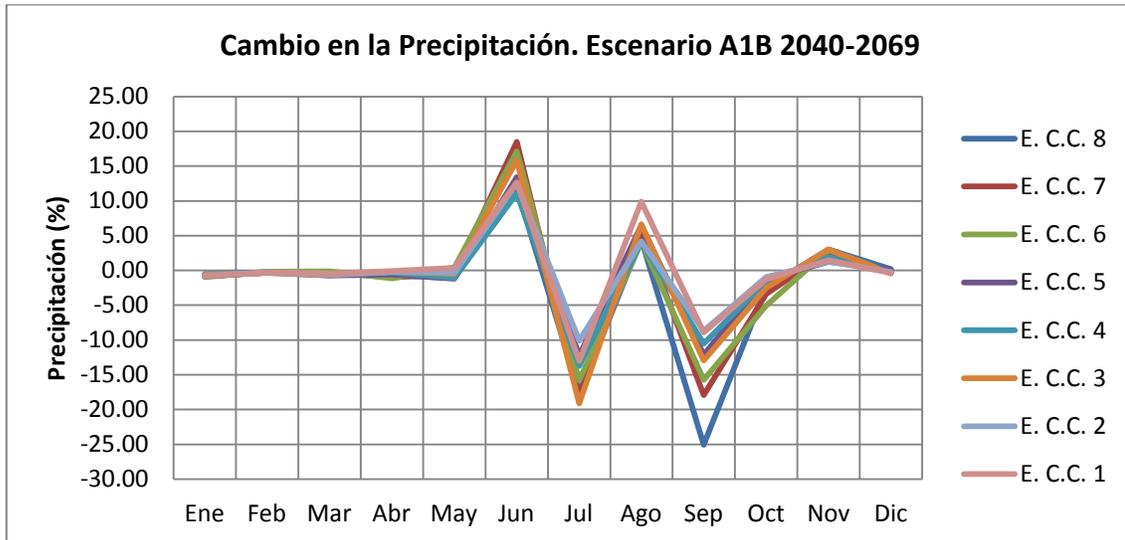


Figura 5.15 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2040-2069.

La temperatura en este escenario sigue el mismo comportamiento en los MF que se encuentran por debajo de la media de los incrementos de la temperatura. Los mínimos cambios predicen un 1.18°C y un máximo cambio de 2.31°C.

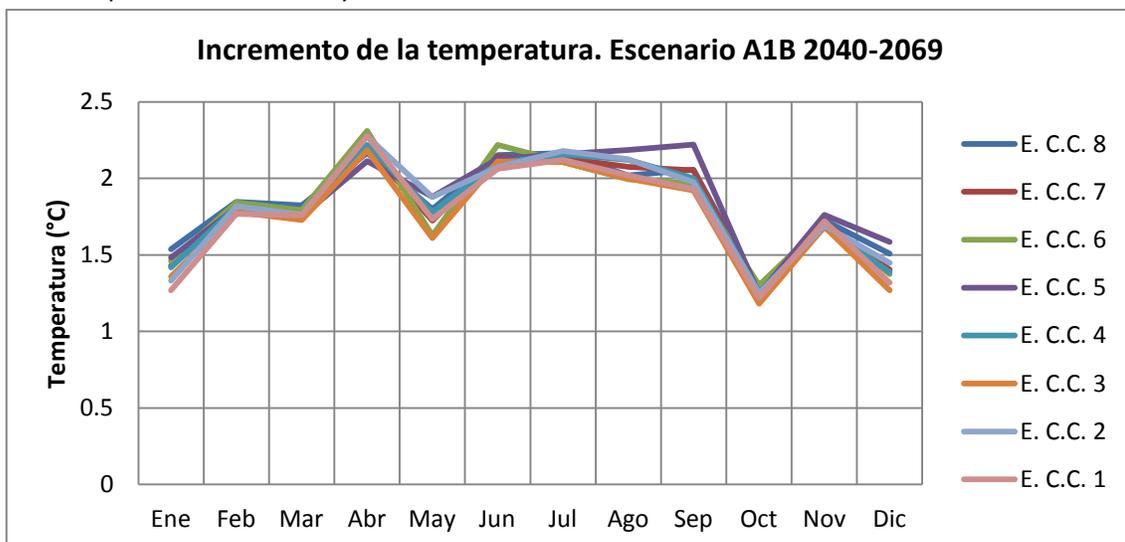


Figura 5.16 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2040-2069.



6. **Escenario A1B 2070-2099** (figuras 5.17 y 5.18). La precipitación para finales de siglo en este escenario se incrementa en los MLL y se agrega noviembre a los cambios en el ciclo hidrológico. Los aumentos de precipitación incrementan a un 12.89% y reducciones de -27.16%. Para los meses MPLL decrece apenas un -0.18%.

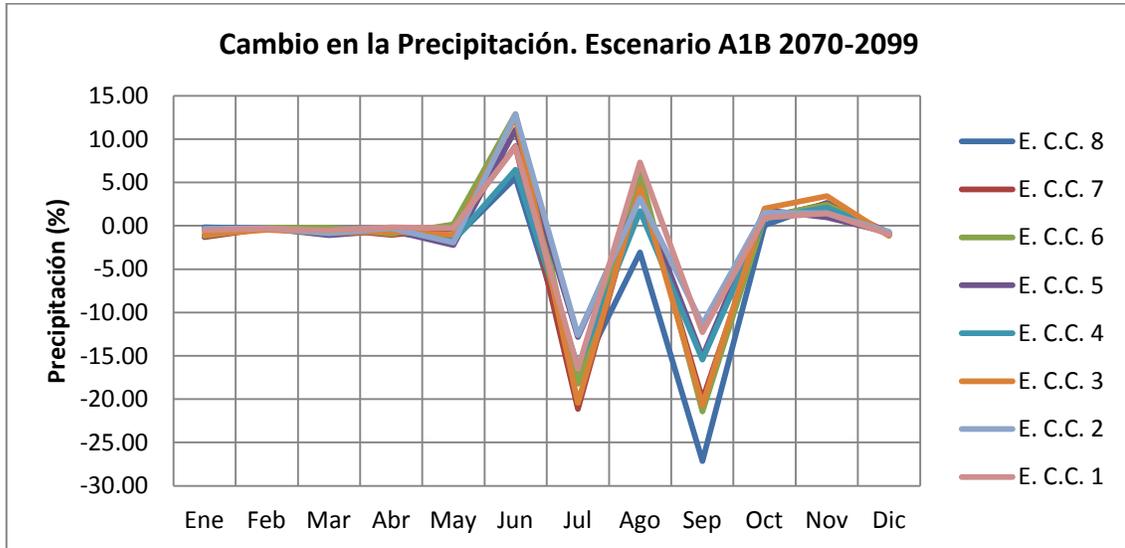


Figura 5.17 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2070-2099.

La temperatura para este escenario es menor que en el escenario A2 en el mismo periodo de tiempo, lo cual indica que los cambios serán más drásticos que en el presente escenario. Alcanza en promedio 2.52°C casi 0.5° menos que en el A2. Las fluctuaciones para estos años se incrementan más que en los años anteriores de este mismo escenario. Lo cual indica cambios más drásticos en la temperatura con incrementos y decrementos en los MC, más sin embargo los MF se encuentran por debajo del promedio.

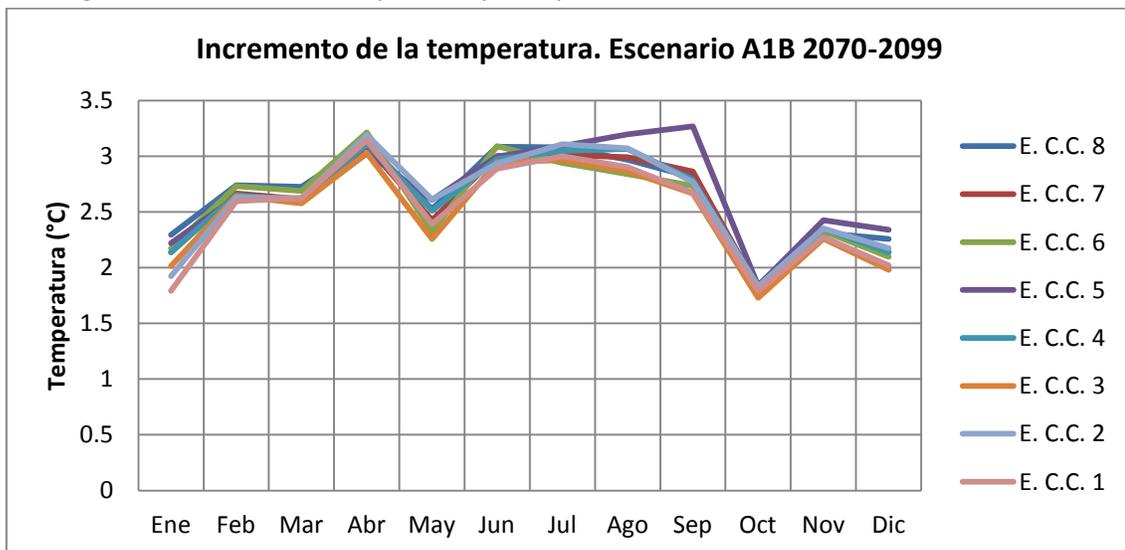


Figura 5.18 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario A1B 2070-2099.



7. **Escenario B1 2010-2039** (figuras 5.19 y 5.20). Este escenario concuerda con el escenario A1B con respecto a la variación de la precipitación, con una diferencia en el mes de noviembre donde para este escenario se plantea incremento de la precipitación. Los decrementos mayores en los MLL se dan en septiembre alcanzando -34.16% y en junio con un 11.88%. En promedio en los MPC se incrementa la precipitación en 0.14%.

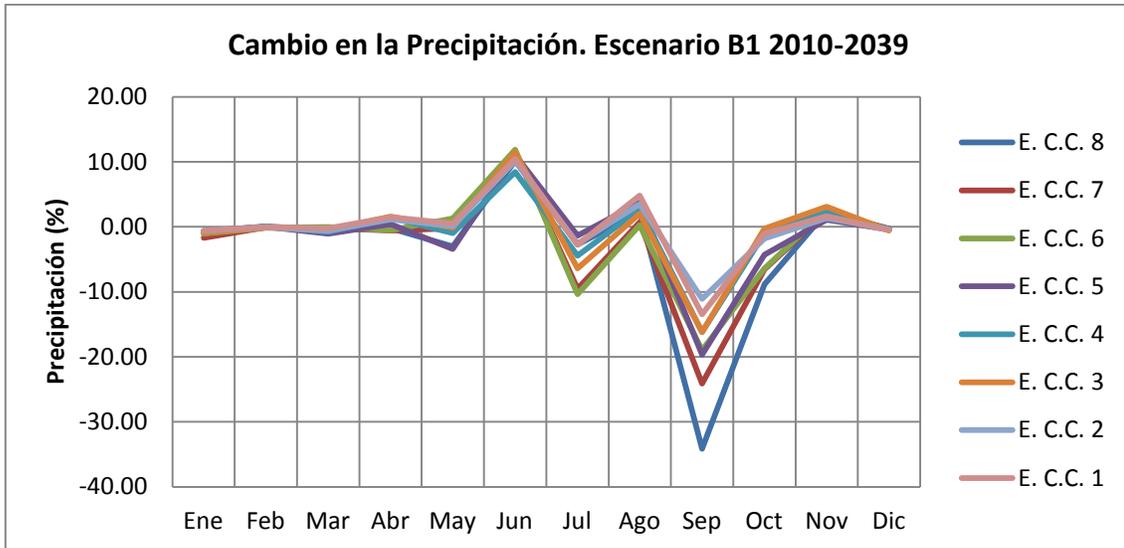


Figura 5.19 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario B1 2010-2039

Los incrementos para este escenario se dan tanto en los meses fríos como en los cálidos, siendo ligeramente mayores en los meses fríos lo cual indica que los meses cálidos incrementen en menor medida que los otros escenarios. Los incrementos de temperatura son menores que en los otros dos escenarios, con un 0.82°C en promedio, con un rango de 0.54°C a 0.98°C.

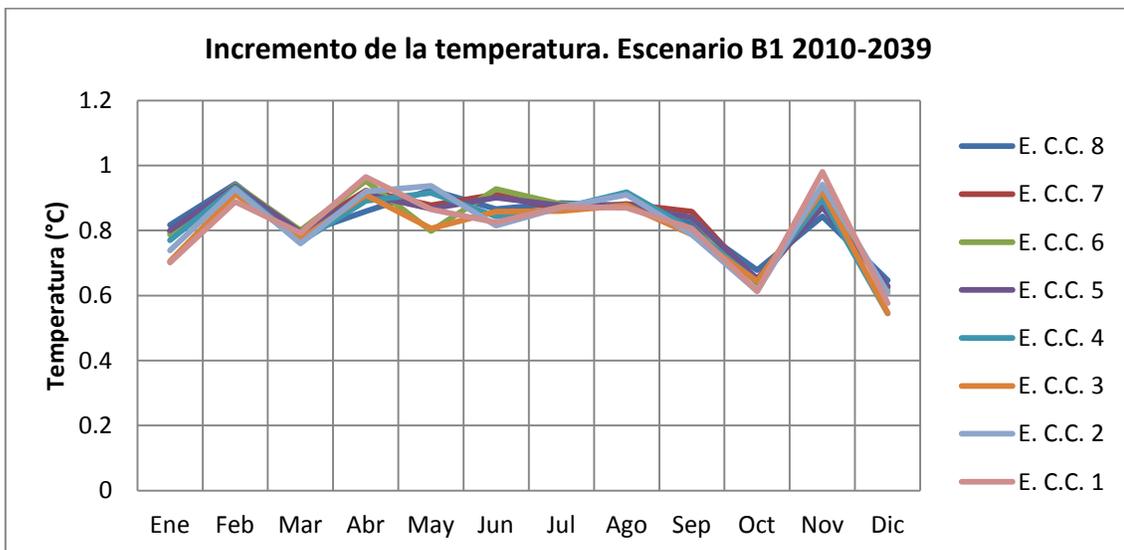


Figura 5.20 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario B1 2010-2039.



8. **Escenario B1 2040-2069** (figuras 5.21 y 5.22). Para este escenario en los MPCC se tiene una reducción máxima del 1.02% e incrementos de hasta un 3.11% y un promedio de 0.14% lo cual indica que se incrementará la lluvia ligeramente. Para los MLL los cambios más drásticos se dan solo en el mes de septiembre alcanzando un -36.27%, también presenta incrementos importantes en junio con un 16.25%, por lo tanto los cambios se reducen debido a la compensación de los meses lluviosos junio y septiembre siendo menos afectado.

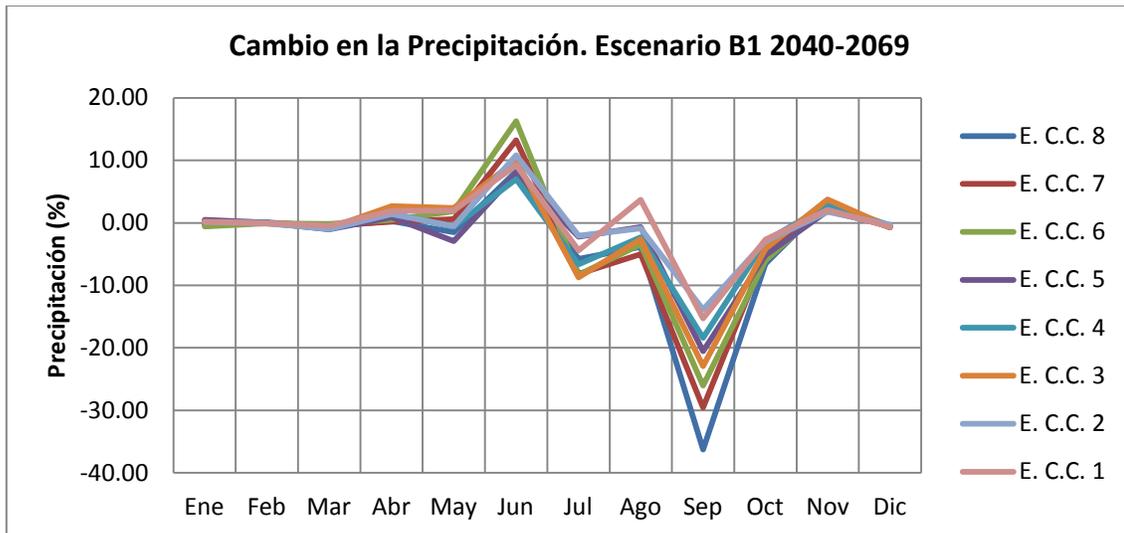


Figura 5.21 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario B1 2040-2069

La temperatura por su parte sigue manteniendo fluctuaciones incrementando en los meses fríos (MF) y en los meses cálidos (MC). La temperatura es menor aproximadamente menor 0.5°C que los otros dos escenarios, por lo tanto este escenario el de mejor comportamiento ante el cambio climático. Los incrementos van de 0.89°C a 1.66°C con un promedio de 1.33°C y solo 0.5°C más que en el escenario A1B 2010-2039.

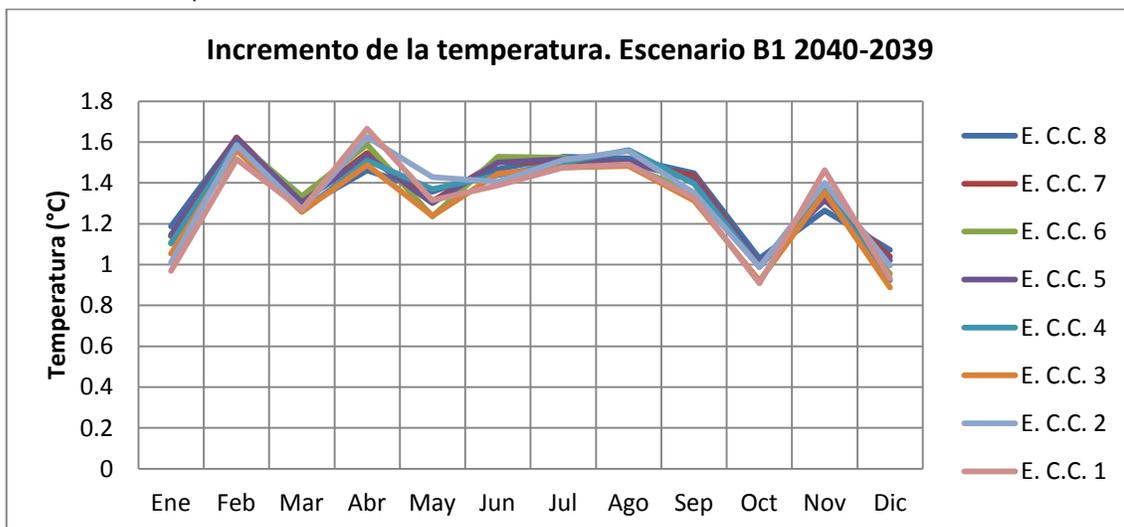


Figura 5.22 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. Escenario B1 2040-2069.



9. **Escenario B1 2070-2099** (figuras 5.23 y 5.24). La precipitación aumenta en la mayoría de los meses y solamente los meses de julio y agosto son los que predicen reducciones de la precipitación, el mes de julio tiene reducciones apenas del -5% y para el mes de septiembre tiene decrementos del -30%. Para el mes de junio se incrementará la precipitación en un 15.65%. Por tales motivos la precipitación no se verá afectada de manera tan drástica en comparación de los otros escenarios.

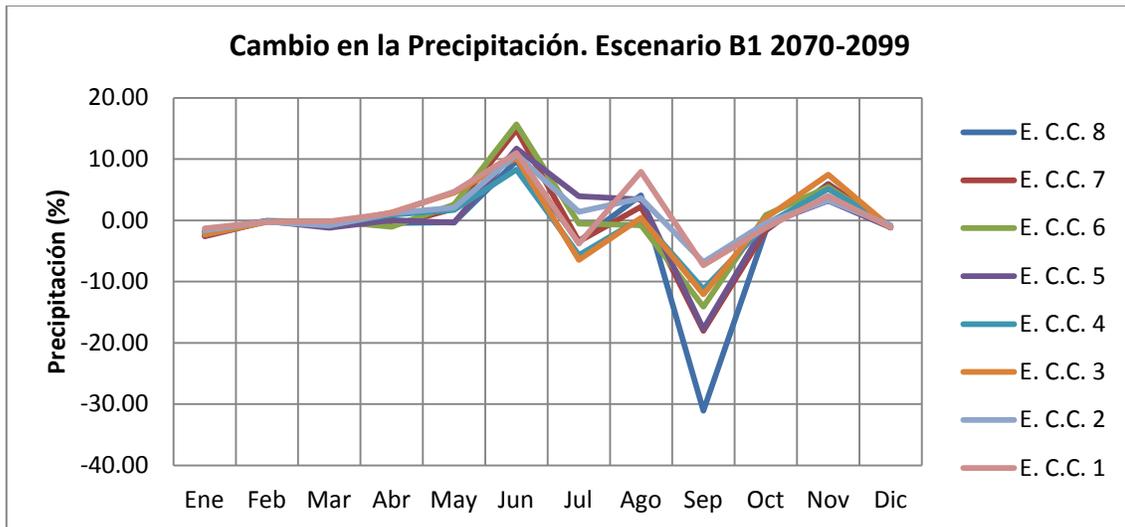


Figura 5.23 Cambio en la precipitación para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. B1 2070-2099.

La temperatura por su parte a pesar de que se sigue incrementando lo hace en menor medida que en los otros dos escenarios A2 y A1B, para este mismo periodo de años apenas se incrementa en promedio 1.78°C solo 0.45°C que en el periodo de años anterior y además de que es muy por debajo que el escenario A2 2070-2099 (2.98°C) y A1B 2070-2099 (2.59°C). En definitiva los recursos hídricos se verán menos afectados en este escenario.

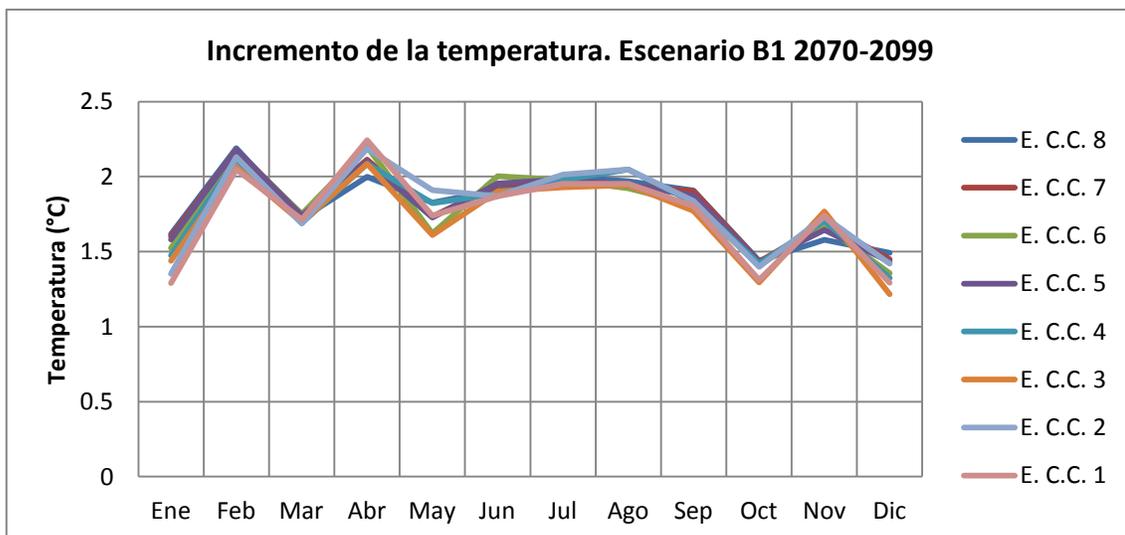


Figura 5.24 Cambio en la temperatura para las estaciones de cambio climático con influencia en el área de estudio. B1 2070-2099



5.2 Obtención de la evapotranspiración.

La evapotranspiración se obtiene de manera estacional para el centro de gravedad en base a las temperaturas en las diferentes zonas de estudio (anexo A), por lo tanto es necesario obtener una estación ficticia en el centro de gravedad de las subcuencas y trasladar las diferentes variables a dicha estación. El método utilizado para el traslado fue el método del inverso de la distancia al cuadrado.

El método utilizado para obtener la evapotranspiración es el de Thornthwaite, el cual requiere datos a escala mensual para la temperatura, además de una latitud definida. Se analizaron tres subcuencas de la cuenca del río grande de Morelia y que presentan escurrimientos dentro de la cuenca del río Grande de Morelia. Además se analizó la evapotranspiración en el Acuífero Morelia-Queréndaro para observar la recarga en el mismo, a continuación se mencionan dichas zonas.

-  Subcuenca Cointzio.
-  Subcuenca Chiquito.
-  Subcuenca Atapaneo.
-  Acuífero Morelia-Queréndaro.

La estación ficticia en la subcuenca Cointzio cuenta con una evapotranspiración actual promedio de 811.4 mm/mes. Los escenarios de cambio climático presentan importantes cambios en la evapotranspiración en las diferentes subcuencas, así como en el acuífero Morelia-Queréndaro.

La familia de los escenarios A2 para los tres escenarios establecidos presenta incrementos de la evapotranspiración del 4.82%, 10.36% y 20.4% para los años 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099 respectivamente. Los incrementos más importantes se presentan en los meses cálidos (MC), es decir abril-septiembre (figura 5.25), teniendo incrementos menores en los meses fríos (MF) octubre-marzo.

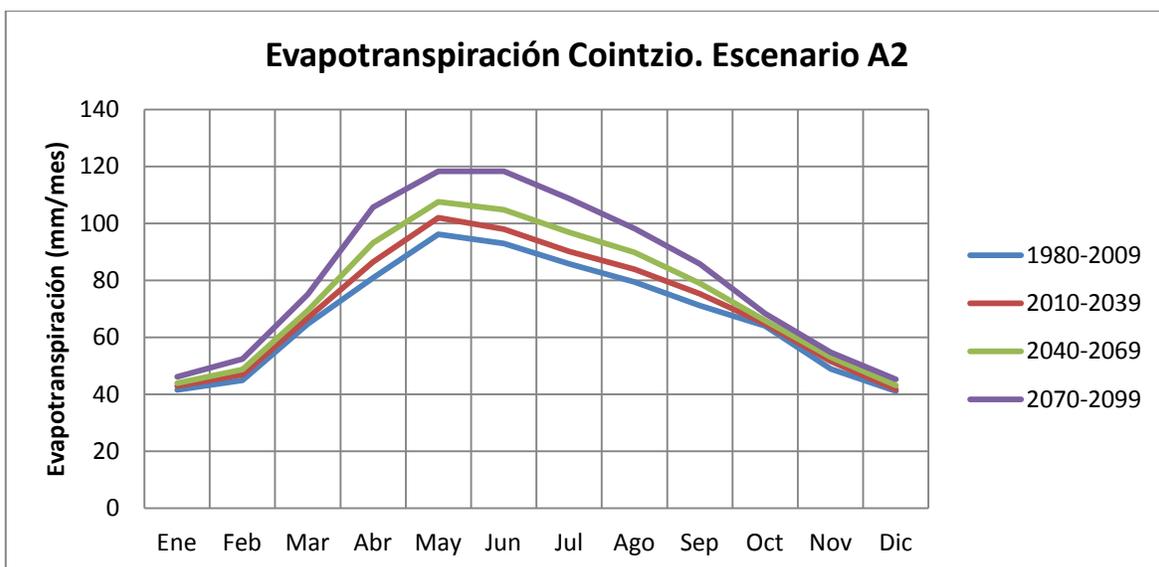


Figura 5.25 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio. Escenario A2.



La evapotranspiración en el escenario A1B presenta una variación en las evapotranspiraciones, es decir decrecentándose e incrementándose para la segunda mitad de los últimos meses cálidos. Los incrementos son menores que el escenario A2, los incrementos alcanzan en promedio anual 3.97% para los años 2010-2039, 8.64% para los años 2040-2069 y 13.46% para los años 2070-2099. Debido a que la evapotranspiración es similar a la actual en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre hace que los escurrimientos sean similares en estos meses (figura 5.26).

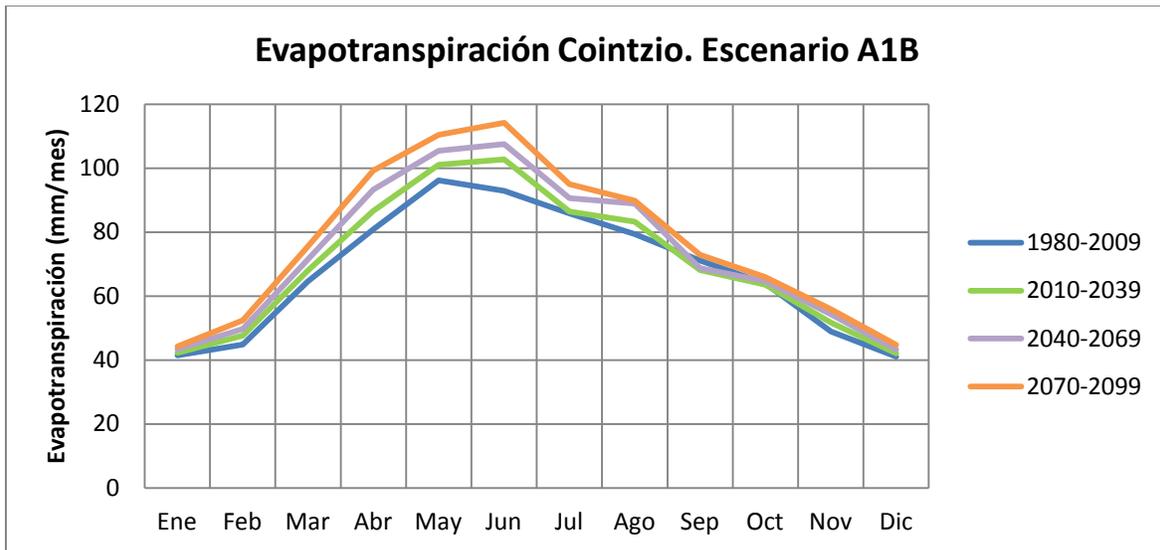


Figura 5.26 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio. Escenario A1B.

El escenario B1 es el más optimista de los escenarios analizados en el presente estudio, a pesar de que para los años 2010-2039 presenta incrementos mayores el presente escenario, para las siguientes dos terceras partes del siglo sus incrementos son más lentos, estos alcanzan en promedio anual 4.4% para los años 2010-2039, 7.68% para los años 2040-2069 y 10.63% para los años 2070-2099 (figura 5.27).

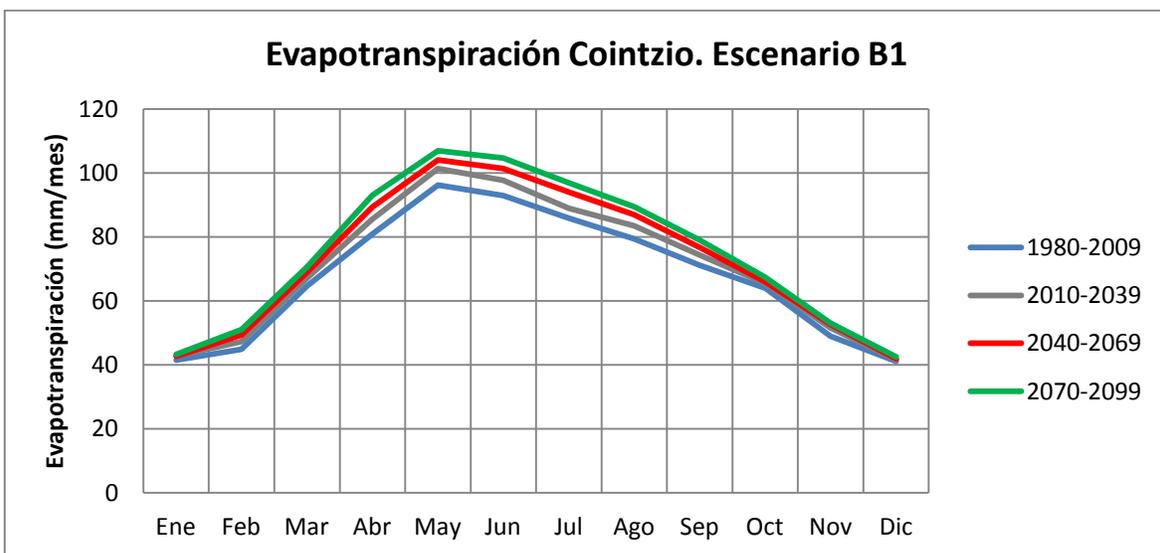


Figura 5.27 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio. Escenario B1.



Haciendo un análisis para el escenario más crítico que es el A2 2070-2099 (figura 5.28), podemos ver que los escurrimientos se verán afectados todo el año, ya que se reduce precipitación de manera considerable en los MLL y se incrementa la evapotranspiración en los MC. El resto de los escenarios para la estación Cointzio se encuentra entre la línea azul y roja para la precipitación y entre la morada y la verde para la evapotranspiración.

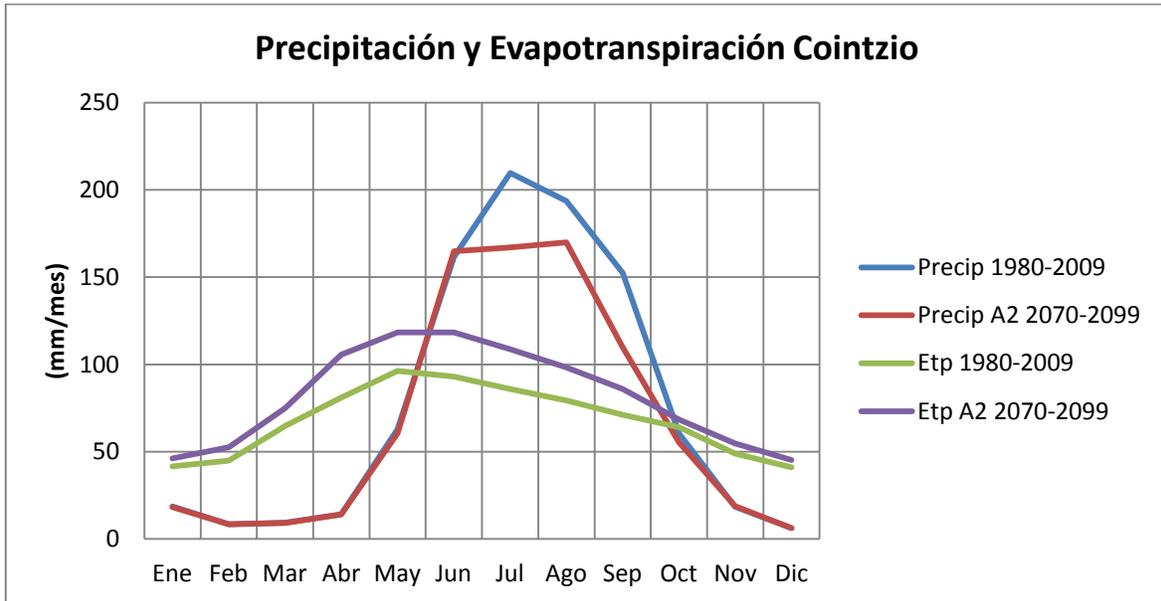


Figura 5.28 Precipitación y evapotranspiración para el escenario A2 2070-2099 en la subcuenca Cointzio.

Los resultados de las evapotranspiraciones para subcuencas Chiquito, Atapaneo y el acuífero Morelia-Queréndaro se encuentran en el **anexo C**.

5.3 Resultados del modelo de Témex

Una vez obtenidas las nuevas condiciones climáticas futuras se procede a calcular las aportaciones actuales y futuras para las subcuencas del río Grande de Morelia y la recarga al acuífero Morelia-Queréndaro; de esta manera se podrán comparar las aportaciones actuales con las aportaciones obtenidas con los escenarios climáticos futuros. Para el este cálculo se utilizó en modelo de Témex en comparación de la metodología de la NOM-011 CONAGUA.

Para el cálculo de las aportaciones actuales se ingresaron los datos de la precipitación y de la evapotranspiración de manera estacional para las subcuencas Cointzio, Chiquito, Atapaneo, y para el Acuífero Morelia-Queréndaro presentados en el capítulo 5.1 y 5.2.

5.3.1 Calibración del modelo.

Para realizar la calibración es necesario contar con el coeficiente de desagüe del acuífero y el coeficiente de escurrimiento para cada subcuenca.



Para la determinación del coeficiente de escurrimiento según la NOM 011 CONAGUA el coeficiente de escurrimiento depende de un parámetro K, que a su vez depende del uso y el tipo de suelo. El coeficiente de escurrimiento varía a lo largo del tiempo ya que la precipitación cambia, así como el uso y el tipo de suelo. Para el presente estudio se consideró el parámetro K constante ya que requiere de un estudio detallado para poder hacer un análisis de cambio de uso y tipo de suelo.

El parámetro k se obtuvo para las tres cuencas de análisis y el acuífero Morelia-Queréndaro, presentando Coeficientes entre 0.263 y 0.281 tal como la indica la tabla 5.1.

Parámetro K			
Cointzio	Chiquito	Atapaneo	Acuífero M-Q
0.2698	0.2810	0.2718	0.2630

Tabla 5.1 Parámetro K para las subcuencas de la cuenca del río Grande de Morelia y el acuífero Morelia-Queréndaro

En base al parámetro k y a la precipitación se obtienen los coeficientes de escurrimiento que van a variar en el tiempo y en el espacio. En la tabla 5.2 se muestran los coeficientes de escurrimiento para el escenario base (1980-2009) donde se encuentran en un rango de 0.1473 a 0.2219.

Coeficiente de escurrimiento Ce			
Cointzio	Chiquito	Atapaneo	Acuífero M-Q
0.16814	0.16362	0.22190	0.14730

Tabla 5.2 Coeficiente de escurrimiento (Ce) para las subcuencas de la cuenca del río Grande de Morelia y el acuífero Morelia-Queréndaro

Por su parte el coeficiente de desagüe del acuífero (α) depende de las salidas naturales del acuífero entre las salidas totales del acuífero en escala mensual. Para nuestro caso el coeficiente de desagüe se obtuvo en base a las salidas por manantiales en el caso de las subcuencas Cointzio y Chiquito, para el caso de la subcuenca Atapaneo y debido a la poca presencia de manantiales en la zona es estableció el parámetro α en función de los mismos. Para el caso del acuífero Morelia-Queréndaro se consideraron todas las salidas por manantiales de acuífero.

Parámetro α			
Cointzio	Chiquito	Atapaneo	Acuífero M-Q
0.01510	0.01510	0.00029	0.01754

Tabla 5.3 Parámetro α para las subcuencas de la cuenca del río Grande de Morelia y acuífero Morelia-Queréndaro

Una vez establecidos estos parámetros se procede a calibrar la humedad máxima y la infiltración máxima, donde en el análisis se observó que el escurrimiento superficial es más sensible a la humedad máxima del suelo ($H_{m\acute{a}x}$), y la infiltración máxima es más sensible a la infiltración máxima ($I_{m\acute{a}x}$) con lo cual es posible acercarnos a los resultados aforados de con mayor precisión.



Los parámetros calibrados se muestran en la tabla 5.4, donde se puede observar los parámetros que permanecen constantes para la calibración (c y a) y los parámetros calibrados (Hmáx e Imáx). Decimos que esta calibrada una aportación cuando los gastos históricos y los gastos simulados presentan un coeficiente de correlación cercano a 1, más sin embargo es muy difícil llegar a la unidad.

Parámetro	Cointzio	Chiquito	Atapaneo	Acuífero M-Q
Hmáx (mm)	568	375	178	479
Imáx (mm/mes)	120	39	150	85
C	0.1681	0.1636	0.2219	0.1473
alfa (1/mes)	0.01510	0.01510	0.00029	0.01754

Tabla 5.4 Parámetros calibrados para las subcuencas de la cuenca del río Grande de Morelia y acuífero Morelia-Queréndaro.

En nuestro caso se busco el promedio anual gastos históricos y simulados sea 0, y así a pesar de tener una variación mensual, anualmente tener los mismos gastos. A manera de ejemplo se muestra la calibración de la aportación del río Chiquito (figura 5.29) donde podemos observar una variación entre los gastos aforados y calculados, más sin embargo se tiene la misma tendencia en las dos y la diferencia es muy cercana a 0.

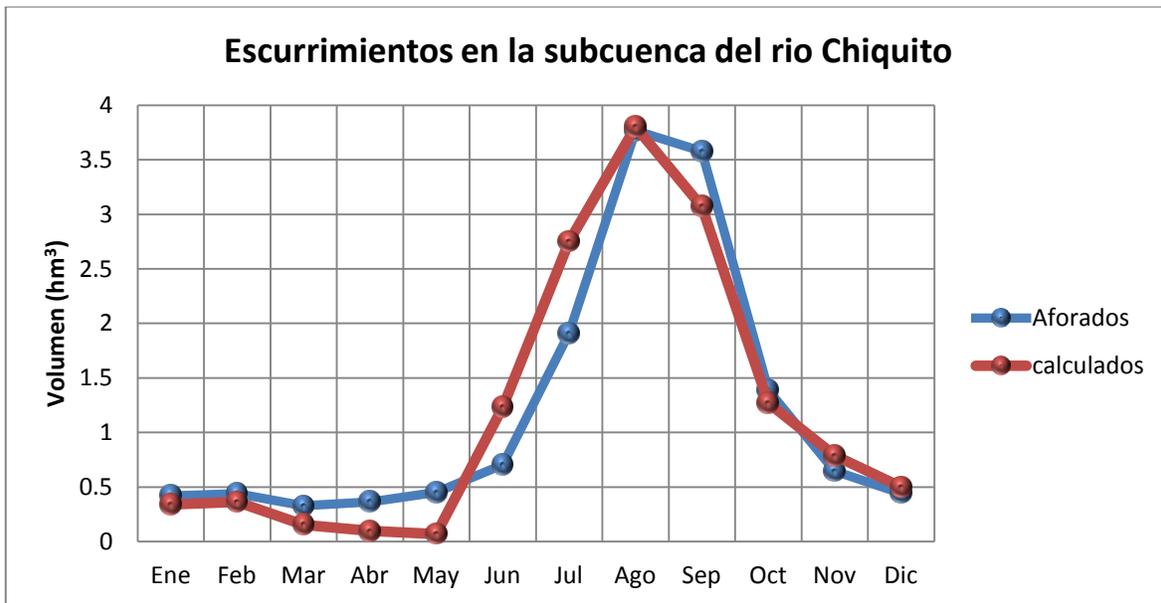


Figura 5.29 Calibración mensual de la subcuenca del río Chiquito para el periodo 1980-2009.

Una vez calibrado el escenario base o periodo histórico (1980-2009), se procede a hacer los traslados de las temperaturas y precipitaciones con cambio climático al centro de gravedad de las subcuencas. Posteriormente se realizan los cambios de las evapotranspiraciones y las precipitaciones y se obtienen los escurrimientos y la recarga al acuífero Morelia-Queréndaro para los diferentes escenarios.



5.3.2 Resultados de los cambios en las aportaciones

Los cambios en las aportaciones que se verán a continuación presentaron sensibilidad un poco mayor en el caso de la temperatura que en la precipitación. A pesar de que en algunos meses las precipitaciones se incrementan, los escurrimientos disminuyen debido al incremento de la temperatura. Los coeficientes de escurrimiento tienen una evolución que presenta una disminución, lo que implica una reducción en las aportaciones. Es importante mencionar que se estableció constante el parámetro k y el parámetro α , debido a que requieren estudios más detallados como cambio de uso y tipo de suelo.

Aportación Cointzio (cabecera). Las aportaciones en la cabecera de la cuenca se ven mayormente afectadas en el presente estudio, recordando de los 10 escenarios analizados, la línea evolutiva o familia de los escenarios A2 son los más críticos, los escenarios de la familia A1B preceden a los A2 y la familia de los escenarios B1 son los más optimistas.

La línea evolutiva A2 se presenta en la (figura 5.30), donde se puede observar una reducción importante de gasto en la mayoría de los meses del año. Los meses que se ven más afectados son los meses de julio, agosto, septiembre y octubre; esto se debe a que, en estos meses tienen la mayor precipitación del año, por su parte los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo tienen decrementos en la aportación de manera más reducida. Los decrementos para el escenario A2 2010-2039 en promedio anual son de 28.43%, para el escenario A2 2040-2069 de 39.87%, y en el más crítico A2 2070-2099 se reduce la aportación un 52.13%.

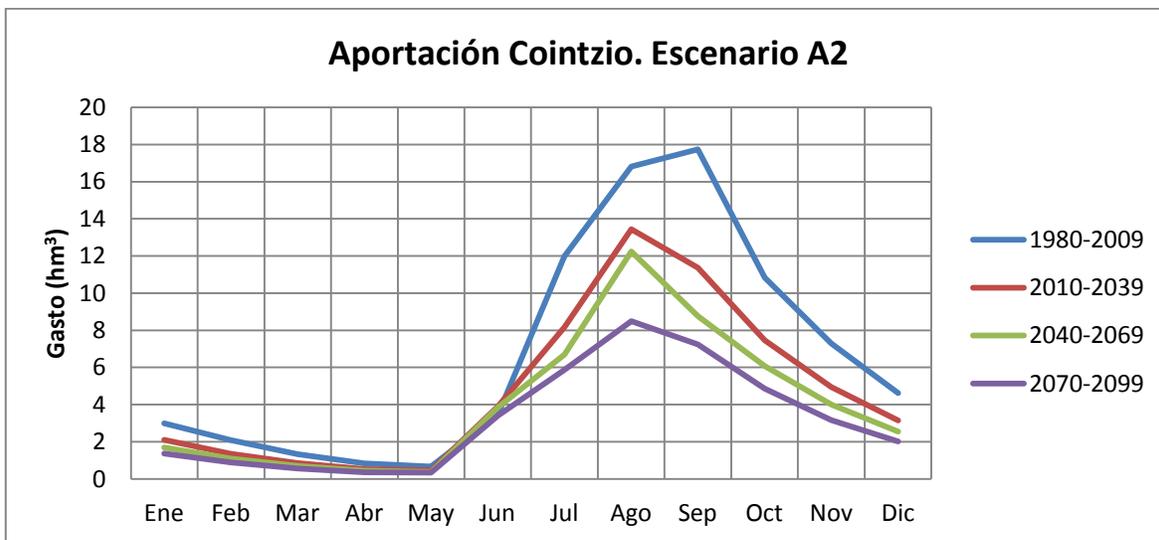


Figura 5.30 Disminución de la aportación Cointzio para la familia del escenario A2.

La aportación Cointzio para la línea evolutiva A1B tiene decrementos menos críticos que la familia de los escenarios A2, por lo tanto los meses más afectados se reducen, en la grafica se observan los meses que presentan reducciones en las aportaciones y los cuales son: de julio a diciembre. Los meses de enero a mayo tienen incrementos menos significativos y el mes de junio presenta



incrementos importantes (figura 5.31). Las aportaciones se reducen en promedio anual en un 11.58%, para el escenario A1B 2010-2039, 21.74% para el A1B 2040-2069 y 29.86% para el escenario A1B 2070-2099.

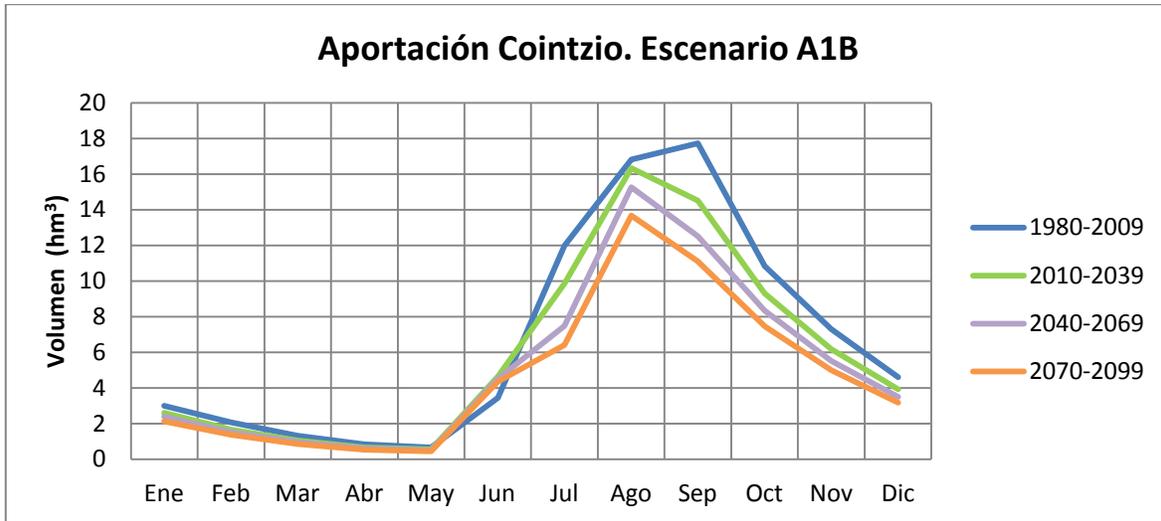


Figura 5.31 Disminución de la aportación Cointzio para la familia del escenario A1B.

La línea evolutiva B1 es la que presenta cambios de menor intensidad que las otras dos familias, la aportación se reduce para los dos primeros escenarios y aumenta en el tercero, es decir para el escenario B1 2010-2039 se tiene una reducción del gasto en promedio anual de 17.11%, para el escenario B1 2040-2069 los decrementos en promedio anual son de 22.62%, más sin embargo para el escenario B1 2070-2099 se recupera la aportación un 4.49% anual, por lo tanto la disminución alcanza un 18.14% (figura 5.32). Los meses más afectados son de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; viéndose más afectado el mes de septiembre con reducción en la aportación de hasta 6 hm³.

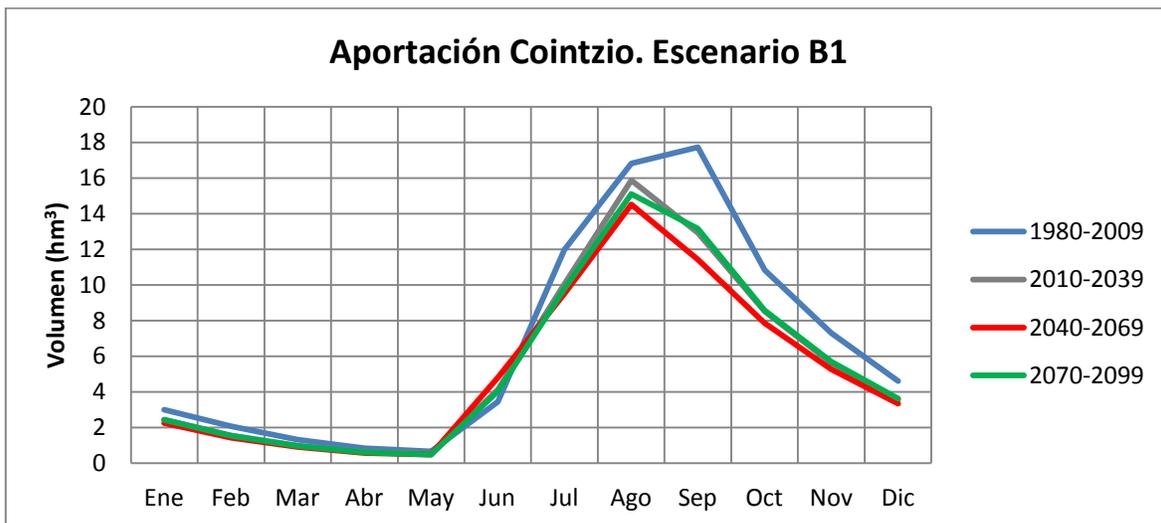


Figura 5.32 Disminución de la aportación Cointzio para la familia del escenario B1.



El coeficiente de escurrimiento para esta aportación se redujo de 0.16814 hasta 0.1537 para el escenario más crítico (A2 2070-2099), tal como se muestra en la tabla 5.5. Este coeficiente para nuestro caso exclusivamente depende de la precipitación sobre la subcuenca. La familia A2 una disminución del Ce más rápida que en las otras dos familias. La familia de los escenarios A1B presenta decrementos del Ce pero con un ritmo mucho más lento que la familia A2. La familia B1 presenta disminución del Ce para los primeros dos escenarios planteados y para el tercer escenario (B1 2070-2099) el Ce es similar al que se presenta para el escenario base.

Escenario	A2	A1B	B1
2010-2039	0.1618	0.1671	0.1659
2040-2069	0.1582	0.1661	0.1648
2070-2099	0.1537	0.1636	0.1685

Tabla 5.5 Evolución del coeficiente de escurrimiento para la aportación Cointzio 2010-2099

Aportación Chiquito. Esta aportación se ve reducida de manera importante y donde la aportación histórica en promedio anual es de 14.43 hm³ y alcanza reducciones de hasta el 38.40% para el escenario más crítico (A2 2070-2099). Esta aportación se ve menos reducida que la aportación de la cabecera de la subcuenca Cointzio con 9.5% menos afectada.

La familia del escenario A2 presenta decrementos importantes en los meses de julio a febrero y donde los más críticos son julio, agosto y septiembre. Para el escenario A2 2010-2039 se tiene una reducción en la aportación del 20.71%, siendo más crítico el mes de septiembre donde se reduce 1.1 hm³. Por su parte el escenario A2 2040-2069 alcanza decrementos de 32.79% en promedio anual y donde el mes más crítico es septiembre reduciéndose 1.78 hm³. Finalmente para escenario A2 2070-2069 se presentaron reducciones de 38.40% en promedio anual, viéndose más afectado el mes de agosto con una reducción de 1.55 hm³ (figura 5.33).

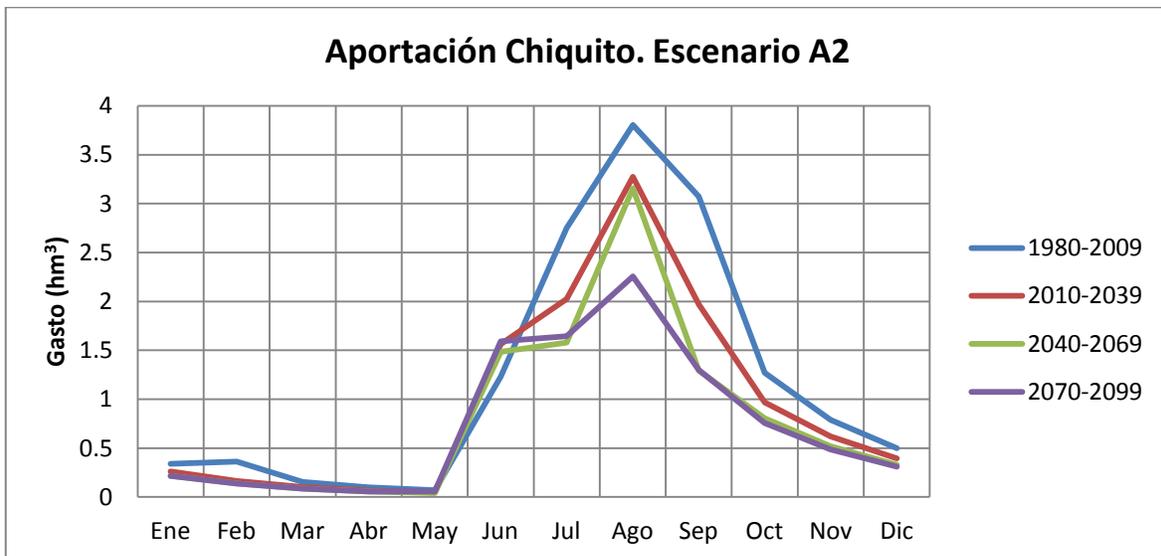


Figura 5.33 Disminución de la aportación Chiquito para la familia del escenario A2.



Los escenarios correspondientes a la familia A1B para la aportación Chiquito presentan incremento en los escurrimientos en los meses de junio y agosto, y decrementos en el resto del año. Los meses más afectados son julio con un decremento de 1.14 hm³ y septiembre con 1.06 hm³. Para el escenario A1B 2010-2039 se espera una disminución de 6.81%, para el A1B 2040-2069 la disminución alcanza 12.29% y para el escenario A1B 2070-2099 se reduce un 18.15% (figura 5.34). En comparación con el escenario A2 2070-2099 estima un 20.25% más en la reducción de la aportación.

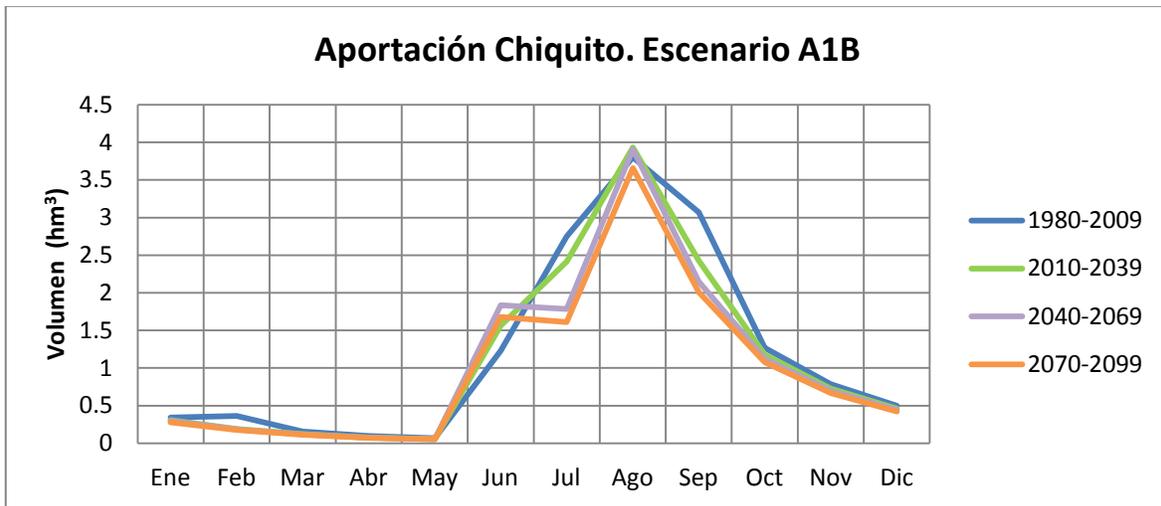


Figura 5.34 Disminución de la aportación Chiquito para la familia del escenario A1B.

La aportación Chiquito por medio de la familia de los escenarios B1 se ve menos afectada por el cambio climático que por otras familias y donde solamente se tienen decrementos importantes en los meses de septiembre donde las reducciones alcanzan para mediados de siglo 1.2 hm³, posteriormente recuperándose para el final del siglo; en el mes de octubre se tienen decrementos para mediados de siglo de 0.28 hm³.

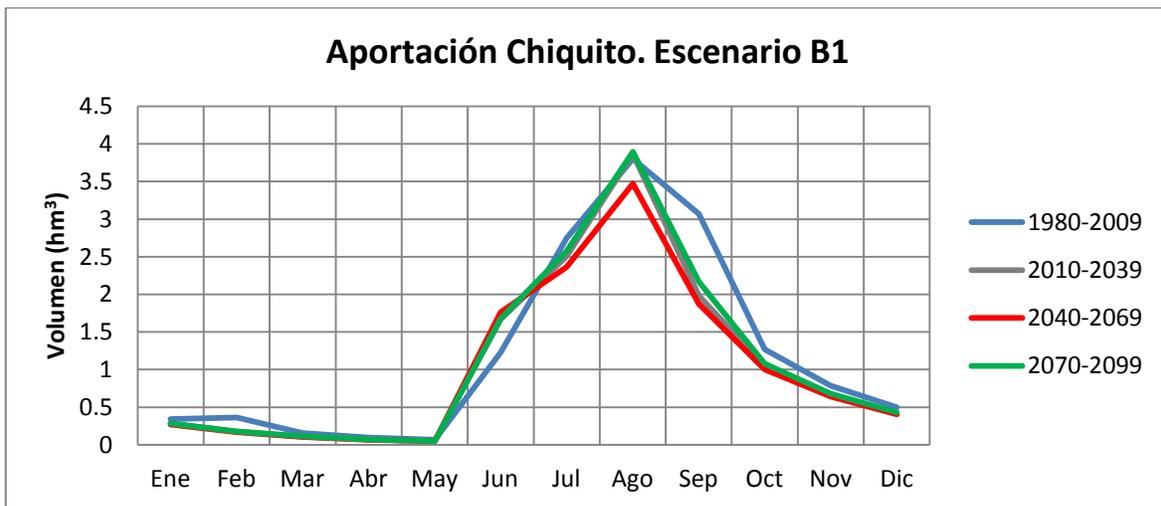


Figura 5.35 Disminución de la aportación Chiquito para la familia del escenario B1.



El escenario B1 2010-2039 presenta decrementos del 11.06%, el B1 2040-2069 15.63% y el B1 2070-2099 8.56% (figura 5.35). Al igual que la aportación Cointzio para el último escenario de la familia B1 se estima que los escurrimientos se recuperarán teniendo una menor afectación en el sistema de recursos hídricos.

El coeficiente de escurrimiento para esta aportación varía más significativamente que en el caso de la aportación Cointzio, ya que, se reduce de 0.16362 a 0.1098 para el escenario A2 2070-2099 (tabla 5.6) alcanzando 0.04 más que la aportación Cointzio. Para la familia de los escenarios A1B se reduce en los tres escenarios planteados, más sin embargo para la familia de los escenarios B1 el coeficiente se incrementa para el escenario B1 2070-2099 lo cual indica un incremento en los escurrimientos.

Escenario	A2	A1B	B1
2010-2039	0.1575	0.1622	0.1613
2040-2069	0.1536	0.1612	0.1600
2070-2099	0.1098	0.1592	0.1638

Tabla 5.6 Evolución del coeficiente de escurrimiento para la aportación Chiquito 2010-2099

Aportación Atapaneo. Esta aportación es importante para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, y si está se ve reducida, se tendrá la necesidad de abastecer agua de la presa Cointzio o de dejar de cultivar en la zona.

La línea evolutiva A2 presenta la disminución en prácticamente todo el año siendo más crítica en los meses de julio, agosto y septiembre. El escenario A2 2010-2039 presenta decrementos en promedio anual de 13.57%, viéndose más afectado el mes de septiembre con una reducción de 5.12 hm³. Para el escenario 2040-2069 se tiene una disminución del 21.25% y donde el mes más crítico nuevamente es septiembre con una disminución de 8.44 hm³. Finalmente para el escenario 2070-2099 se tienen una disminución del 30.41% siendo el mes más crítico agosto donde se tiene una disminución de 6.12 hm³ con respecto del escenario 2040-2069 (figura 5.36).

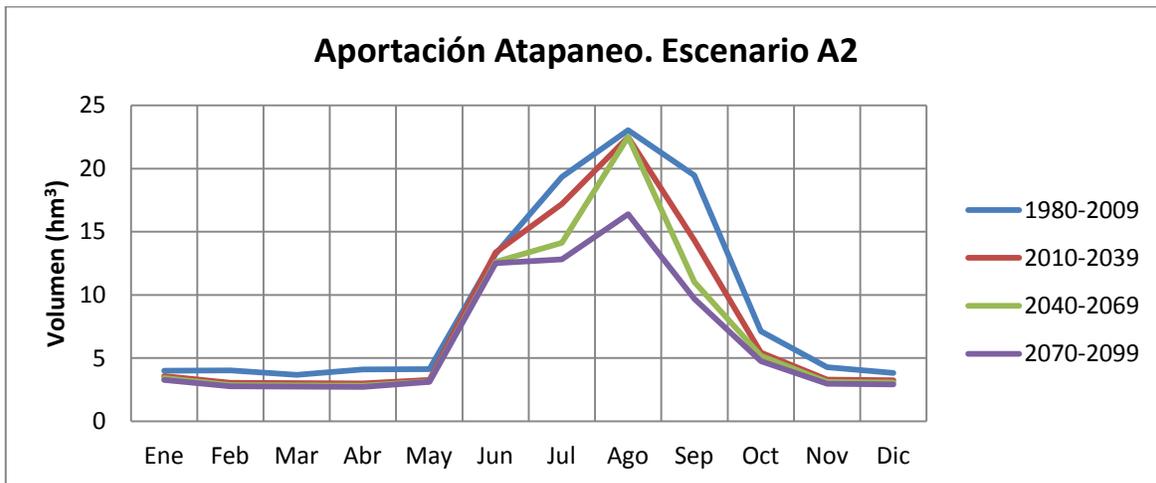


Figura 5.36 Disminución de la aportación Atapaneo para la familia del escenario A2.



La línea evolutiva A1B tiene una menor afectación a la aportación Atapaneo y donde se presentan decrementos en todo el año para los dos de los tres escenarios donde en el mes de junio para el escenario 2010-2039 se tiene un incremento del 6.91%, en promedio anual la disminución de la aportación es del 7.41%, para el escenario 2040-2069 se tienen disminuciones que alcanzan el 13.85% y 16.93% para el escenario 2070-2099 (figura 5.37), con respecto al escenario A2 los cambios son menores en un rango de 35% a 45%.

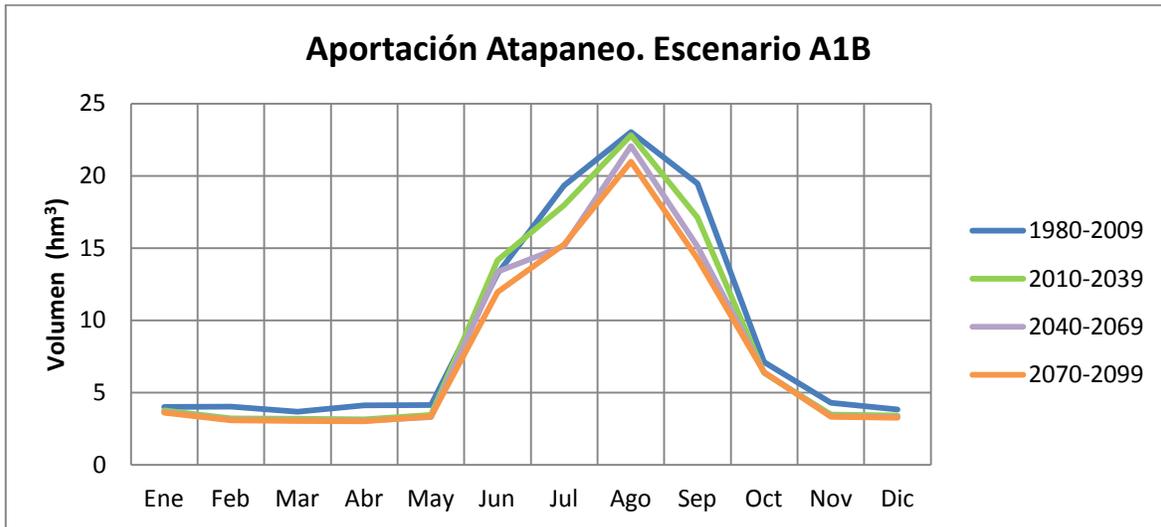


Figura 5.37 Disminución de la aportación Atapaneo para la familia del escenario A1B.

Al igual que en las otras dos aportaciones presentadas la familia de los escenarios B1 (figura 5.38) es la que presenta cambios negativos e incluso positivos para la aportación. El escurrimiento se incrementa en los meses de junio, julio y agosto y presenta cambios negativos en el resto del año. Para el escenario B1 2010-2039 se tiene una disminución del 7.55% viéndose más afectado el mes de septiembre con un decremento de 1.3 hm³, el mes que presenta los mayores escurrimientos es el mes de agosto incrementándose en base al periodo histórico en 2.38 hm³. El escenario B1 2040-2069 presenta una disminución de la aportación en promedio anual del 11.18% y decrementos en todos los meses excepto en junio. Finalmente para el escenario B1 2070-2099 se tiene una importante recuperación de la aportación y donde presenta una reducción de 6.09%. Esta reducción es menor incluso que para los años 2010-2039.

Haciendo comparación de las tres familias de escenarios en las aportaciones más críticas, el escenario más crítico es el A2 con una reducción del 30.41% seguido del escenario A1B con una reducción del 16.93% y finalmente el B1 con una reducción de 11.18%.

La aportación de Atapaneo es la que presenta el coeficiente mayor de los casos analizados (debido a la zona urbana) el coeficiente de escurrimiento (Ce) para el escenario base es de 0.2219 el cual se reduce hasta 0.1433 para el escenario más crítico (A2 2070-2099). La familia de los escenarios más optimistas es la B1 donde el coeficiente se reduce lentamente, seguido del la familia de los escenario A1B y la más crítica es la familia de los escenarios A2 (tabla 5.7).

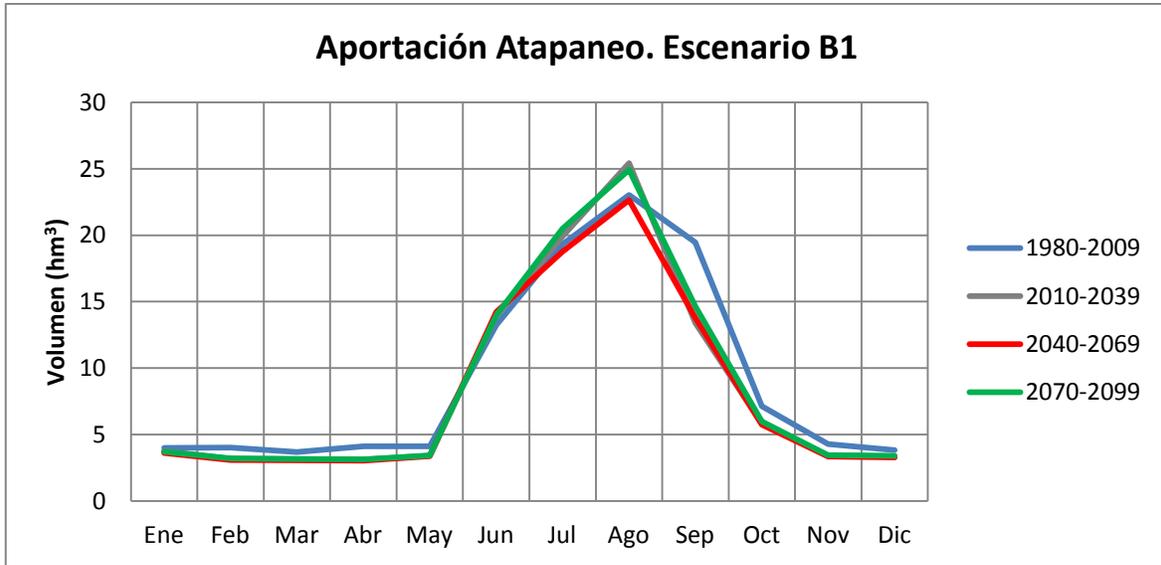


Figura 5.38 Disminución de la aportación Atapaneo para la familia del escenario B1.

Escenario	A2	A1B	B1
2010-2039	0.2071	0.2107	0.2124
2040-2069	0.2011	0.2083	0.2103
2070-2099	0.1433	0.2023	0.2161

Tabla 5.7 Evolución del coeficiente de escurrimiento para la aportación Atapaneo 2010-2099

5.3.3 Recarga al acuífero Morelia-Queréndaro

Para el acuífero Morelia-Queréndaro se han analizado los escurrimientos y la recarga, más sin embargo para el presente estudio se analizará la recarga al acuífero, debido a que es necesario para plantear los escenarios para la modelación del acuífero y la modelación conjunta del sistema subterráneo y el sistema superficial.

El acuífero Morelia-Queréndaro presenta en el periodo histórico 1980-2009 una recarga en promedio anual de 161.72 hm³ y un escurrimiento de 240.47 hm³ los cuales se ven afectados de manera importante en los meses lluviosos (MLL) debido al cambio climático. Los escurrimientos superficiales para la familia de los escenarios A2 se reduce en un 30.47% para el escenario más crítico (A2 2070-2099). El aumento en la aportación se da en el mes de junio y una disminución en el resto del año, siendo los meses más afectados de julio a octubre.

La recarga al acuífero para el escenario base se presenta en los meses de enero, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. Debido al cambio climático los meses que se verán más afectados son de julio a septiembre. La disminución en la recarga para el escenario A2 2010-2039 se estima en un 17.55% y donde en el mes de septiembre se dejarían de infiltrar 15.9 hm³ en promedio. En el escenario A2 2040-2069 se estima que dejará de infiltrar en promedio anual 28.49% y en el mes de septiembre se estima que se dejarán de infiltrar alrededor de 25.6 hm³ con respecto al escenario base. Para el escenario A2 2070-2099 las disminuciones de la recarga en



promedio anual serán del 30.63% muy similares a las del escenario A2 2040-2069, más sin embargo en este escenario se tienen los mayores decrementos en el mes de agosto donde se dejarían de infiltrar 15.55 hm³ con respecto del escenario base (figura 5.39).

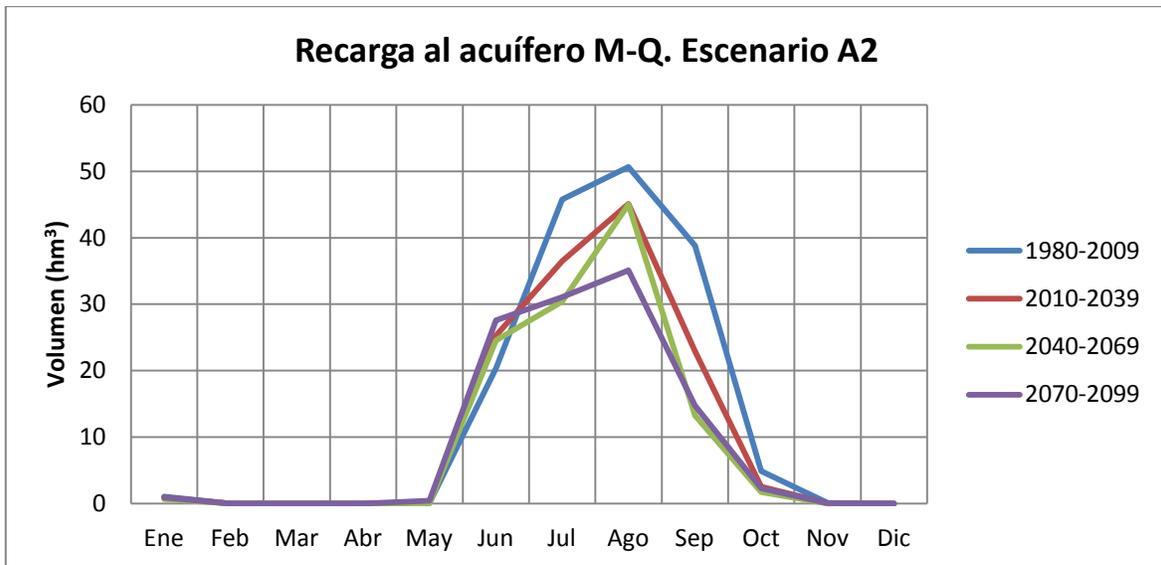


Figura 5.39 Disminución en la recarga al acuífero Morelia-Queréndaro para la familia del escenario A2.

La línea evolutiva A1B estima disminución en los escurrimientos en todos los meses excepto en el mes de junio y agosto donde se estiman incrementos en los escurrimientos. La disminución de la aportación en promedio anual es menor que en la línea evolutiva A2, estimando un 11.07% para el final del siglo.

La recarga al acuífero también presenta disminuciones y aumentos, los incrementos se dan en los meses de junio, agosto y octubre; los decrementos se dan en los meses de enero, mayo, julio, septiembre y noviembre. Para el escenario A1B 2010-2039 se estiman disminuciones del 2.78%, para el escenario A1B 2040-2069 llegan a 6.44% y para el escenario A1B 2070-2099 la disminución es del 11.44% (figura 5.40). El acuífero no se vio afectado de manera más importante debido a los meses que presentaban incrementos en la recarga, principalmente en el mes de agosto que es de los meses que más llueve en el acuífero Morelia-Queréndaro.

La línea evolutiva B1 para los escurrimientos superficiales en el acuífero, estima reducciones del 6.12%, 13% y 4.68% para los escenarios B1 2010-2039, B1 2040-2069 y B1 2070-2099 respectivamente. El escurrimiento al igual que en las otras aportaciones se incrementa para el último tercio del siglo y donde se verán menos afectadas las diferentes áreas de estudio analizadas para el presente trabajo.

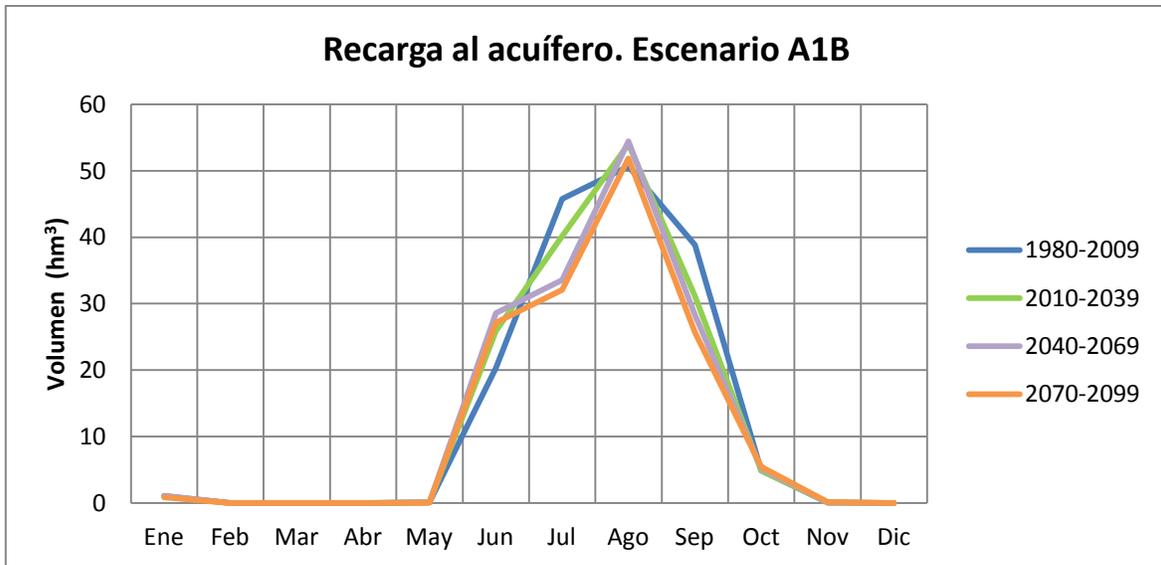


Figura 5.40 Disminución en la recarga al acuífero Morelia-Queréndaro para la familia del escenario A1B.

La recarga al acuífero se ve afectada, más sin embargo no de manera tan importante como en las otras dos familias, en promedio anual se reduce la recarga en un 7.58% para el escenario B1 2010-2039 viéndose mayormente afectado el mes de septiembre donde se dejarían de recargar 15.36 hm³. El escenario B1 2040-2069 estima disminución de la recarga de 11.58% y el escenario B1 2070-2099 estima incrementos en la infiltración y reduciéndose solamente 5.48% con respecto al escenario base (figura 5.41).

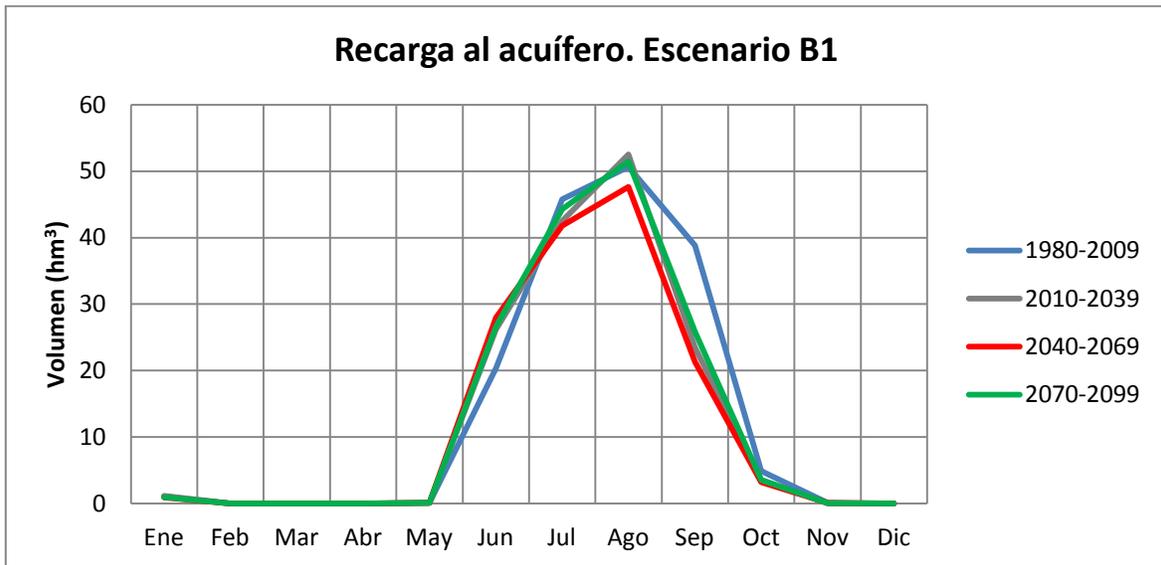


Figura 5.41 Disminución en la recarga al acuífero Morelia-Queréndaro para la familia del escenario B1.



5.4 Resultados de la modelación del acuífero Morelia Queréndaro mediante AQUIVAL.

La modelación del acuífero Morelia-Queréndaro es necesaria para la estimación de los niveles piezométricos en el acuífero, así como para ver su evolución a lo largo del tiempo, incluyendo los efectos del cambio climático. Al igual que en las aportaciones es necesario una calibración donde están interactuando todas las recargas, así como todos los bombeos realizados en el acuífero y además debemos conocer los niveles piezométricos para poder calibrar el acuífero. Una vez calibrado será posible ver el funcionamiento del acuífero y la disminución de los niveles para el periodo de años que se desee estimar.

De acuerdo a los intereses de la modelación del acuífero Morelia-Queréndaro, que son los niveles piezométricos en la zona de Morelia y el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro incluyendo el cambio climático; es necesario realizar ciertas hipótesis y la discretización del acuífero, tratando de alcanzar los objetivos y para no trabajar innecesariamente en la modelación, ya que requiere de trabajo arduo para la calibración del modelo.

5.4.1 Discretización del acuífero Morelia-Queréndaro.

- La malla se discretizó de 3000 metros de largo y 3000 metros.
- Se consideró zona de flujo horizontal en 235 celdas teniendo un área total de 2115 km²
- La totalidad del lago de Cuitzeo se considera de nivel constante tiene importantes entradas de gasto de la cuenca del río Grande de Morelia, la cuenca del río Queréndaro Zinapécuaro y zonas aledañas al lago.
- La dirección del flujo subterráneo se realiza predominantemente en dirección del lago de Cuitzeo.
- Recibe recarga horizontal a través de 13 canales de las zonas altas de del acuífero y posiblemente de los acuíferos colindantes que son: los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo ubicados al norte en el estado de Guanajuato, los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro localizados al poniente, al sur recibe recarga de los acuíferos Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente de los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, en el estado de Michoacán. (CONAGUA 2009a).
- El acuífero Morelia-Queréndaro se considera de manera general de tipo libre; de acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, cuenta con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo.
- Se considera un nivel de referencia 0 en la celda 7-8 localizada en el lago de Cuitzeo con una elevación constante de 1795.4 msnm.

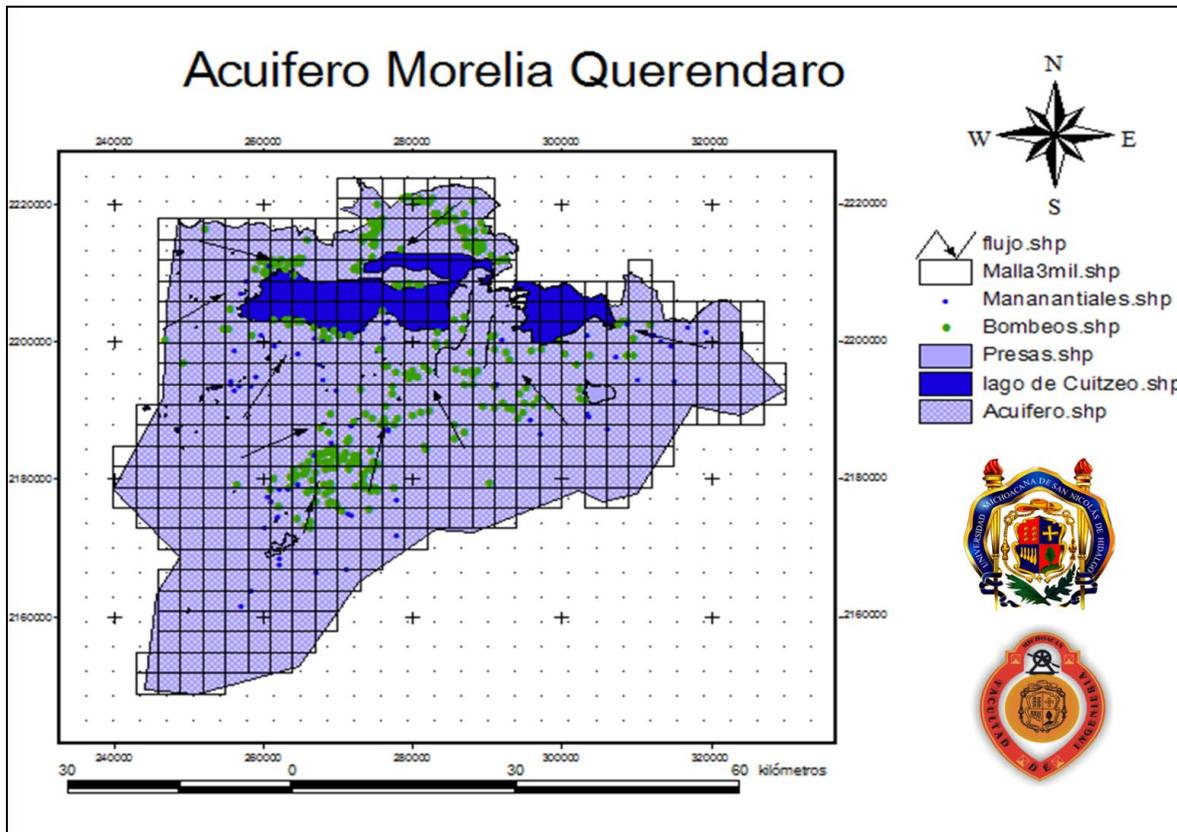


Figura 5.42 Discretización del acuífero, manantiales y bombes en el área de estudio

5.4.2 Hipótesis del acuífero Morelia-Queréndaro.

- Las demandas urbanas se dividieron en: demandas urbanas de la zona de Morelia y demandas urbanas de otras poblaciones del acuífero.
- La demanda agrícola se dividió por Módulos que son: el Módulo 3 y el Módulo 4
- La distribución de la recarga vertical o por lluvia se consideró uniforme para la totalidad del acuífero.
- La distribución de la recarga horizontal se consideró uniforme en todo el perímetro del acuífero.
- La salida por evapotranspiración se consideró solamente para donde los niveles piezométricos se encuentran a menos de 10 metros de profundidad de la superficie.

5.4.3 Modelo de diferencias finitas en AQUIVAL.

Se realizó una malla de 3000 x 3000 metros de diferencias finitas o elementos finitos adaptada a la forma del acuífero.

En las condiciones de contorno de las celdas que componen en el acuífero se consideraron tres tipos diferentes: celdas activas, celdas inactivas y celdas de nivel constante tal y como se muestran en la figura 5.44



Figura 5.43 Se muestran en rojo los canales de entradas al acuífero, las salidas horizontales al lago y las flechas en color negro indican la dirección del flujo subterráneo fuente (CONAGUA 2009)

Acciones Elementales

Fichero cargado: C:\ACUIFE\1\ACCIONES.AEP

- recarga inducida
- recarga vertical
- recarga horizontal
- salida al lago
- salida manantiales
- salida por evapotranspiraci
- otros bombeos
- bombeo modulo 3
- bombeo modulo 4

Nuevo, Añadir, Editar, Borrar, Salir

S : COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

	C 5	C 6	C 7	C 8
R 13	0,13	0,13	0,13	0,13
R 14	0,13	0,13	0,13	0,13
R 15	0,1	0,1	0,1	0,1
R 16	0,1	0,1	0,1	0,1
R 17	0,1	0,1	0,1	0,1
R 18	0	0,1	0,1	0,1
R 19	0	0,1	0,1	0,1
R 20	0	0,1	0,1	0,1

OK, Cancelar

Parámetros de control

Fichero cargado: C:\ACUIFE\1\CONTROL3.PCP

Parámetros de control

- salidas totales
- vol total almacenado
- nivel final 7
- morelia
- mor uniforme dist
- modulo 3
- modulo 4

Nuevo, Añadir, Editar, Borrar, Salir

Tx : TRANSMISIVIDAD EN DIRECCIÓN FILAS

	C 15	C 16	C 17	C 18
R 3	3000	3000	3000	3000
R 4	3000	3000	3000	3000
R 5	3000	3000	3000	Inactiva
R 6	3000	3000	3000	3000
R 7	3000	3000	3000	3000
R 8	3000	3000	2000	3000
R 9	3000	3000	2000	3000
R 10	3000	3000	2000	2000

OK, Cancelar

Parámetros Hidrodinámicos

Valores comunes

- Transmisividad en filas ($T_x = m^2/día$): 3000
- Transmisividad en columnas ($T_y = m^2/día$): 3000
- Coefficiente de Almacenamiento: 0,13
- Factor de goteo ($C_v = k_v/b \cdot días^{-1}$): 0
- Altura inicial (m):
- Nivel externo (m):

Aplicar

Figura 5.44 Acuífero en el entorno de AQUIVAL con sus diferentes componentes.

En cuanto a las características hidrodinámicas iniciales del acuífero se tomaron en cuenta algunos estudios realizados con anterioridad principalmente “Estudio geohidrologico cualitativo del



acuífero Morelia-Queréndaro” (CNA 1990). Se consideraron transmisividades de 2592 a 3456 $m^2/día$, y coeficiente de almacenamiento de 0.1 a 0.13.

5.4.4 Definición de acciones elementales.

Para la simulación del acuífero Morelia-Queréndaro se consideraron las siguientes acciones elementales

Recarga inducida. Esta recarga está constituida por recarga por retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 y por retornos por fugas de la red de abastecimiento de agua potable.

Recarga vertical. Esta infiltración proviene de la lluvia en el acuífero, se calculo con el modelo de Témez que nos permite conocer el caudal que escurre y el caudal que recarga el acuífero. Como se muestra en la figura 5.45.

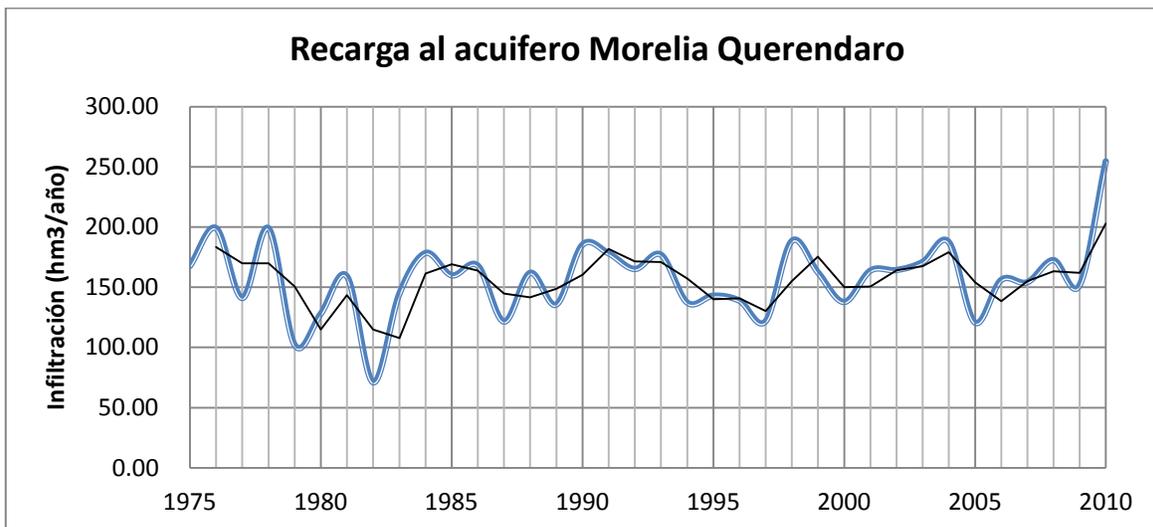


Figura 5.45 Infiltración Media Anual en el Acuífero Morelia-Queréndaro, calculada con el Modelo de Témez

Recarga horizontal. Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero.

Salidas al lago. Estas salidas son debido a la conexión del acuífero con el lago.

Salida por manantiales. Son las descargas por manantiales que se presentan de manera natural, más sin embargo de ellas se aprovecha para algunos usos como puede ser el urbano y el agrícola principalmente.

Bombes urbanos de Morelia. Son los bombes de pozos profundos que se encuentran en la zona urbana de Morelia.



Salida por evapotranspiración. En algunas zonas del área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

Bombeos Módulo 3. Son los bombeos procedentes del distrito 020 Morelia-Queréndaro correspondientes al Módulo 3 ubicado en los municipios de Álvaro Obregón, y parte de Zinapécuaro.

Bombeos Módulo 4. Son los bombeos procedentes del distrito 020 Morelia-Queréndaro correspondientes al Módulo 4 ubicado en los municipios de Zinapécuaro y una pequeña porción de Álvaro Obregón

Otros bombeos. Son los demás bombeos que se realizan en el acuífero y que consideran todos los demás bombeos que se hacen sin considerar todos los antes mencionados.

CEPAMISA. Son las salidas procedentes de la demanda industrial de la que se extraen del manantial Mintzita ubicado al poniente de la ciudad de Morelia.

Mintzita. Son las salidas procedentes del manantial Mintzita para satisfacer parte de las demandas del municipio de Morelia.

5.4.5 Definición de los parámetros de control.

Los parámetros de control se introdujeron para ayudarnos a la calibración del acuífero Morelia-Queréndaro, estos parámetros nos servirán para la simulación de la gestión conjunta en el modelo AQUATOOL.

Salidas Totales del Acuífero. Nos sirve para conocer todo lo que se bombea del acuífero, de manera general podemos ver como se está comportando el acuífero con respecto a lo que estamos bombeando y lo que estamos recargando a lo largo de una escala de tiempo.

Volumen Total Almacenado. Este parámetro nos sirve para ver de manera general si el acuífero esta almacenando agua en un periodo de tiempo o todo lo que se está recargando sale del acuífero y no se almacena ningún volumen de agua.

Morelia. Con este parámetro de control podemos conocer los niveles piezometricos en la zona de Morelia cómo han evolucionado en el tiempo, este parámetro es indispensable para calibrar el acuífero en esta zona.

Módulo 3. A partir de este parámetro podemos visualizar cómo se comportan los niveles piezometricos en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro correspondiente a el área del Módulo 3. Es importante ver la evolución de estos niveles ya que nos ayudan a calibrar e acuífero además que para un futuro podemos observar como seguirán evolucionando a lo largo del tiempo.

Módulo 4. En este parámetro podemos visualizar la evolución de los niveles piezometricos en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro correspondiente al área del Módulo 4.



5.4.6 Simulación y calibración

Una vez definidas las acciones elementales y parámetros de control del acuífero Morelia-Queréndaro, se procedió a realizar el periodo de tiempo de la simulación que es de 35 años y se introdujeron las intensidades (hm^3/mes) de las acciones elementales (tabla 5.8).

Mes	Recarga Inducida (hm^3)	Recarga Horizontal (hm^3)	Recarga vertical (hm^3)	Salidas al lago (hm^3)	Salidas por manantial (hm^3)	Evapotranspiración (hm^3)
Octubre	3.208	7.333	4.892	-0.275	-0.777	-5.350
Noviembre	3.208	7.333	0.074	-0.275	-0.777	-5.350
Diciembre	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Enero	3.208	7.333	1.051	-0.275	-0.777	-5.350
Febrero	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Marzo	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Abril	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Mayo	3.208	7.333	0.078	-0.275	-0.777	-5.350
Junio	3.208	7.333	20.345	-0.275	-0.777	-5.350
Julio	3.208	7.333	45.773	-0.275	-0.777	-5.350
Agosto	3.208	7.333	50.661	-0.275	-0.777	-5.350
Septiembre	3.208	7.333	38.843	-0.275	-0.777	-5.350
$\Sigma=$	38.500	88.000	161.717	-3.300	-9.324	-64.200

Tabla 5.8 Intensidades mensuales y anuales en promedio anual para las diferentes acciones elementales ejercidas sobre el acuífero Morelia-Queréndaro.

Mes	Otros bombes (hm^3)	Módulo 3 (hm^3)	Módulo 4 (hm^3)	Morelia (hm^3)	Mintzita (hm^3)	CEPAMISA (hm^3)
Octubre	-10.607	-0.390	-0.020	-2.500	-2.952	-1.296
Noviembre	-10.555	-0.376	-0.087	-2.500	-2.952	-1.296
Diciembre	-10.276	-0.646	-0.094	-2.500	-2.952	-1.296
Enero	-9.076	-1.864	-0.076	-2.500	-2.952	-1.296
Febrero	-9.154	-1.706	-0.156	-2.500	-2.952	-1.296
Marzo	-10.873	-0.083	-0.061	-2.500	-2.952	-1.296
Abril	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Mayo	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Junio	-10.863	-0.153	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Julio	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Agosto	-10.979	-0.037	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Septiembre	-10.675	-0.294	-0.048	-2.500	-2.952	-1.296
$\Sigma=$	-126.109	-5.549	-0.542	-30.000	-35.424	-15.552

Tabla 5.8 (continuación)



Para la simulación en AQUIVAL se inició con los datos promedio de transmisividad y coeficiente de almacenamientos presentados en estudios previos, posteriormente para su calibración se modificaron los coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad para encontrar un mejor comportamiento en el acuífero y en las zonas de interés.

Para la calibración se utilizaron los valores de los últimos años teniendo en cuenta que la información obtenida es muy poca más sin embargo se trato de representar lo mejor posible la realidad.

Cuando son adoptados valores de transmisividad de $3000 \text{ m}^2/\text{día}$ en las celdas de modelo (tanto en X como Y para la todo el acuífero excepto el Módulo 3 y el Módulo 4 del Distrito de Riego que se utilizaron valores de $2000 \text{ m}^2/\text{día}$ en x e y , y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.1 para la zona de Morelia, 0.15 para los distritos de riego y 0.13 para el resto del acuífero , se observó que el modelo del acuífero Morelia-Queréndaro en AQUIVAL evoluciona de manera similar a la piezometría registrada en la zona de estudio.

Para la calibración se procuró que para los últimos años que los niveles piezometricos fueran muy similares a los que se tenían registro para las zonas de Morelia, Módulo 3 y Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

En la zona de Morelia el abatimiento para los últimos 5 años fue de aproximadamente 3 m/año, y pendientes de descenso entre el 10 y el 30% con lo cual podemos concluir que esta zona se puede ver seriamente afectada si se incrementa el bombeo. Es importante mencionar que el acuífero presenta déficits de gran consideración y el más claro ejemplo se refleja directamente en los niveles piezometricos, de continuar en dichas condiciones en algunos años se pueden presentar serios problemas en el suministro del agua.

Para el Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro los resultados presentaron abatimientos cercanos a 0.9 m/año (de los últimos 5 años) con pendientes de descenso entre el 6 y el 8%. Estos abatimientos se encuentran en este rango debido que a la dirección del flujo subterráneo es en dirección a esta zona, si no fuera el caso los abatimientos serian mayores que los presentados.

Los abatimientos de los últimos 5 años correspondientes al Módulo 4 del Distrito de Riego indican un descenso de 1 m/año y pendientes de descenso entre el 6 y el 8%. Los niveles en esta zona son similares a los del Módulo 3 y estos podrían aumentar en caso de la sobre explotación en otras zonas podrían cambiar la dirección del flujo subterráneo afectando de manera considerable el Distrito de Riego principalmente este Módulo.

Para el año 2010 se presentan en la tabla 5.9 y en la figura 5.46 los resultados en cuanto a los niveles piezometricos calibrados y simulados.



Calibración para Diciembre de 2010			
Nivel	Morelia	Módulo 3	Módulo 4
calibrado (m)	174.7095	64.79304	49.21332
observado (m)	174.43496	65.306667	50.27
diferencia (m)	0.2745407	-0.51363	-1.05668

Tabla 5.9 Muestra el acuífero calibrado referenciado en la celda 7-8

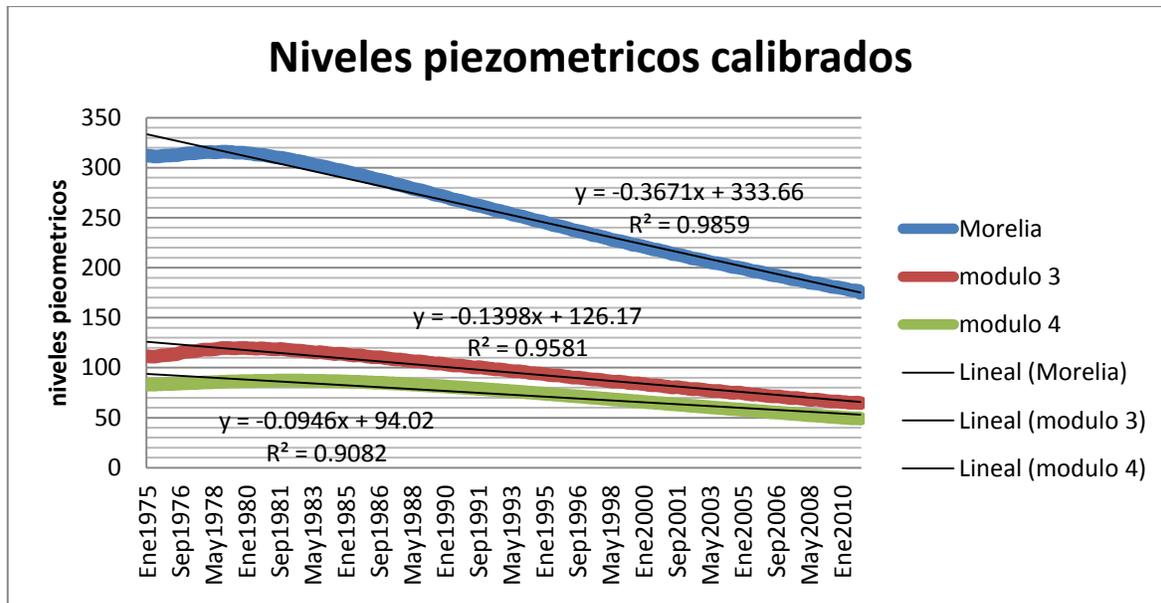


Figura 5.46. Evolución de los niveles piezometricos para el periodo enero de 1975 diciembre de 2010.

Para los escenarios de cambio climático se pueden realizar en el entorno de AQUIVAL o en el entorno de AQUATOOL/SIMGES. Para nuestro caso se eligió trabajar el sistema en conjunto, por lo tanto la evolución de los niveles piezometricos se presentará en la el capítulo 5.8.

5.5.- Resultados de las demandas agrícolas mediante CROPWAT

El requerimiento de los cultivos fue obtenido mediante la metodología de la FAO, utilizando el programa CROPWAT 8.0 para Windows y en base a los escenarios de cambio climático propuestos en el presente trabajo. Es importante mencionar que el requerimiento de agua de los cultivos depende directamente de dos factores que son: la precipitación y el clima. Al disminuir la precipitación en una zona de riego aumenta proporcionalmente la demanda de agua al sistema de recursos hídricos, y al incrementarse la temperatura en dicha zona se incrementa la insolación y la humedad disminuye, lo que provoca una mayor evapotranspiración en la zona de riego. Si a esto agregamos que los días serán despejados (sin nubes) soleados, y si la velocidad del viento



aumenta se incrementará la demanda de agua en el sistema. En la tabla 5.10 podemos observar como al cambiar las condiciones climáticas cambiara la necesidad de agua para los cultivos.

Factores climáticos	Necesidad de agua para cultivos	
	alta	baja
Temperatura	Caluroso	Fresco
humedad	baja (seca)	alta (húmedo)
Velocidad del viento	Ventoso	Poco viento
Sol	Soleado (sin nubes)	Nublado (sin sol)

Tabla 5.10 Factores climáticos que afectan la necesidad de agua para los cultivos (FAO 2009).

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia visto en capítulo 3.3. Generalmente se utiliza como referencia la alfalfa o un pasto bien regado, en pleno desarrollo y en buenas condiciones fitosanitarias.

5.5.1 La evapotranspiración de cultivo (ET_c.)

El Etc expresa el valor de la evapotranspiración que produce un cultivo sin estrés hídrico y en buenas condiciones, es decir sin enfermedades, cultivado en una parcela extensa, en condiciones de suelo óptimo, con fertilización y agua suficiente, y que alcanza su pleno potencial de producción en el medio vegetativo dado.

El ET_c resulta del producto de la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el coeficiente de cultivo K_c, es decir, $ET_c = ET_o * K_c$. Coeficiente de cultivo (K_c). Es la relación entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), cuando ambas se dan en condiciones de crecimiento óptimas y en grandes parcelas.

El coeficiente de cultivo (k_c) indica la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la cosecha. El k_c inicial es pequeño y aumenta a medida que la planta cubre el suelo. Los valores máximos de k_c se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrece durante la fase de maduración. Los principales factores que determinan el coeficiente de cultivo son el clima, suelo y tipo de cultivo. Debido a que se carece de la información se ha optado por utilizar como método general de determinación de coeficientes el expuesto en la publicación de la FAO No 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO, titulada "Evapotranspiración del cultivo - Guías para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo". En la tabla 5.11 se muestran las diferentes variables para uno de los cultivos que se tienen en la zona de estudio.



Cultivo Avena					
Variable	inicial	desarrollo	medio	final	total
Kc	0.35		1.15	0.45	
Etapa (días)	15	30	65	40	150
Profundidad Radicular (m)	0.3			1.25	
Agotamiento Crítico (fracción)	0.72		0.5	0.62	
F. Respuesta de Rendimiento	1	1	1	1	1
Altura de Cultivo (m)			1		

Tabla 5.11 Diferentes variables necesarias para el cálculo del requerimiento del cultivo.

5.5.2 Temperatura máxima y mínima.

Se realizó una interpolación creando una estación ficticia al centro de los Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro por medio del método del inverso de la distancia al cuadrado, haciendo el traslado de la temperatura máxima y mínima histórica, así como para la temperatura máxima y mínima obtenida a partir de los escenarios propuestos.

Mes	Temp Mín	Temp Máx	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	0.80	25.80	60	173	13.00	22.90	4.08
Febrero	0.90	26.80	59	173	13.70	26.20	4.73
Marzo	2.40	28.90	59	173	14.50	29.90	5.66
Abril	4.20	30.50	59	173	15.20	32.60	6.42
Mayo	6.50	30.20	61	173	14.70	32.10	6.40
Junio	8.10	30.60	62	173	14.60	31.70	6.45
Julio	8.60	28.50	64	173	13.40	29.90	5.89
Agosto	8.90	30.80	63	173	14.10	30.80	6.29
Septiembre	8.20	29.30	63	173	13.10	28.20	5.67
Octubre	6.00	26.70	63	173	12.30	24.90	4.70
Noviembre	4.00	26.40	62	173	12.50	22.70	4.17
Diciembre	2.70	25.90	61	173	12.40	21.30	3.86
Promedio	5.1	28.4	61	173	13.6	27.8	5.36

Tabla 5.12 Datos necesarios para la obtención de la ETo para el Módulo 1 (1980-2009).

Humedad relativa, velocidad del viento, insolación y radiación. Estos datos se han estimado a partir de la ubicación (latitud, longitud y elevación sobre el nivel del mar) de los Módulos de riego



así como de las temperaturas mínimas y máximas. A manera de ejemplo en la tabla 5.12 se muestran las diferentes variables para el Módulo 1 necesarias para llegar calcular la ETo.

5.5.3 Precipitación total mensual

Se realizó una interpolación al centro de gravedad de los Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro por medio del método del inverso de la distancia al cuadrado, haciendo el traslado de la precipitación mensual acumulada histórica y la precipitación para los escenarios propuestos de cambio climático.

Desde el punto de vista de producción agrícola, la precipitación efectiva se refiere a la parte de la precipitación que puede ser efectivamente utilizada por las plantas. Esto significa que no toda la precipitación está a disposición de los cultivos, ya que una parte se pierde a través del Esguerrimiento Superficial (ES) y de la Percolación Profunda (PP).

Cuánta agua se infiltra en realidad en el suelo depende del tipo de suelo, pendiente, tipo de cultivos, intensidad de la precipitación y el contenido inicial de agua en el suelo. El método más preciso para determinar la precipitación efectiva es a través de observación en campo. La lluvia es altamente efectiva cuando poco o nada se pierde por ES. Bajas precipitaciones son poco efectivas pues se pierden rápidamente por evaporación.

Para obtener la Precipitación efectiva se utilizo el método de la USDA (Soil Conservation Service). Ecuación desarrollada por el USCS, por medio de la cual la Precipitación efectiva puede ser calculada de acuerdo a los valores mensuales de precipitación (figura 5.47):

$$P_{ef} = P_{mensual} * \frac{125 - (0.2 * P_{mensual})}{125} \quad \text{Para } P_{mensual} \leq 250mm$$

$$P_{ef} = 125 + 0.1 * P_{mensual} \quad \text{Para } P_{mensual} > 250 mm$$

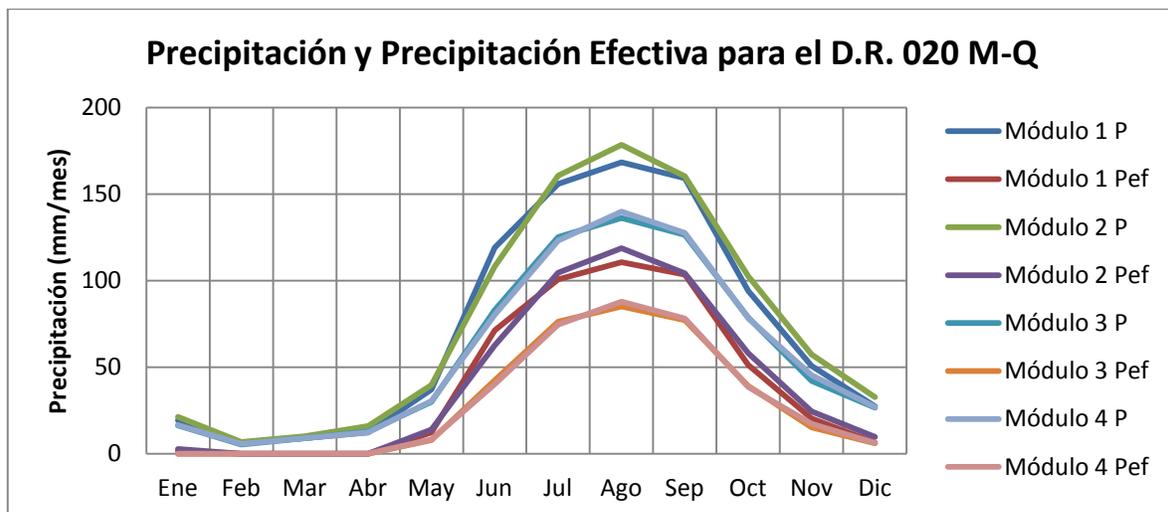


Figura 5.47 Precipitación mensual acumulada (P) y mensual acumulada efectiva (P_{ef}) para el centro de gravedad de los Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.



5.5.4 Cultivos analizados

Para analizar los cultivos de los diferentes Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se hizo un análisis para los últimos 5 años y observar los cultivos representativos de cada uno de los Módulos. En la figura 5.48 se pueden observar los cultivos representativos para los cuatro Módulos analizados, para el Módulo 1 se consideraron 3 cultivos, para el Módulo 2 solo 2 y para los Módulos 3 y 4 se consideraron 6 cultivos representativos.

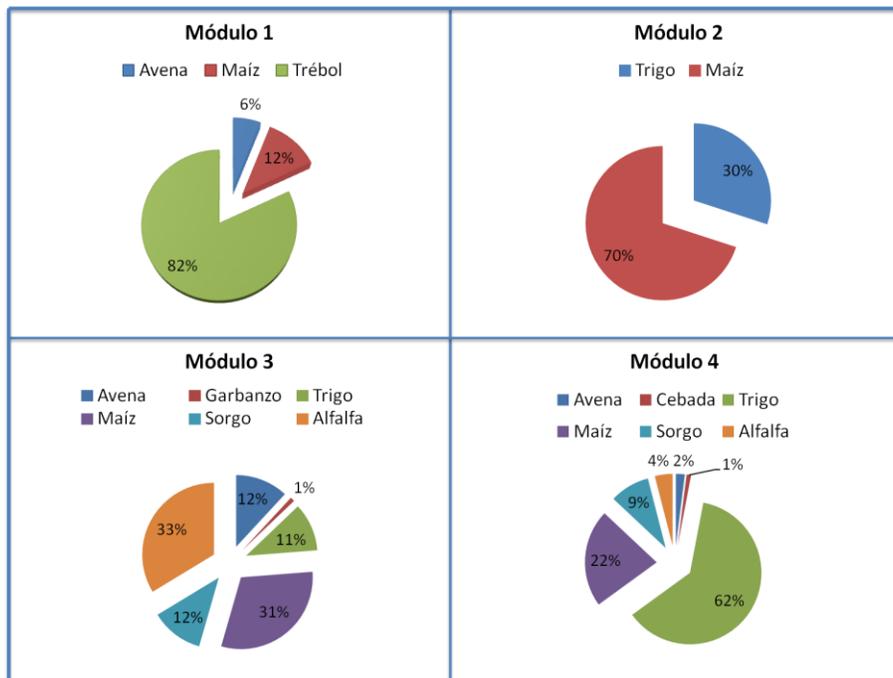


Figura 5.48 Cultivos para los cuatro Módulos analizados en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

5.5.5 Suelo.

Las características del suelo son identificadas mediante los mapas de tipo de suelo proporcionados por INEGI en escala 1:250000. Los cuatro Módulos se encuentran en un 98% en el tipo de suelo correspondiente a la arena, por lo tanto se decide trabajar para los 4 Módulos con el tipo de suelo arena, sus principales características se encuentran expresadas en la tabla 5.13.

Características de la Arena		
humedad del suelo disponible total (CC-PMP)	80	mm/metro
Tasa máxima de infiltración de la precipitación	38	mm/día
Profundidad radicular máxima	900	cm
Agotamiento inicial de humedad del suelo como % de ADT	50	%
Humedad del suelo inicialmente disponible	40	mm/metro

Tabla 5.13 Características de la arena necesarias para obtener el requerimiento de los cultivos.



5.5.6 Patrón de cultivo y Programación.

Una vez creados todos los cultivos pertenecientes al Módulo se procede a crear el calendario de riego donde se agregan las fechas de siembra, todos los cultivos considerados en el Módulo y el peso de cada cultivo por hectárea. En el cálculo de los calendarios de riego podemos observar el déficit de precipitación mensual así como los requerimientos netos del sistema o las necesidades de riego (NR) las que se determinan por:

$$NR = ET_c - P_{ef}$$

Es importante mencionar que no se consideró la eficiencia del sistema, es decir se trabajó con volúmenes netos, posteriormente se calcularon los volúmenes brutos para cada Módulo en base a la eficiencia histórica de los canales de riego. Los resultados para las condiciones actuales como para los escenarios propuestos se analizarán en los siguientes apartados tanto por cultivo como por Módulo. A continuación se muestran las figuras con las variaciones de las dotaciones netas de los cultivos (m³/ha) para todos los escenarios climáticos. Para obtener las demandas netas es necesario conocer las superficies cultivadas de cada uno de los cultivos en el sistema de explotación de la cuenca del río Grande. Para obtener las demandas brutas, es necesario conocer las eficiencias de aplicación del agua. Las eficiencias que se han considerado son las que se presentaron en el capítulo 4.4.3.

5.5.7 Resultados para los diferentes cultivos

El Módulo 1 para la línea evolutiva más crítica (A2), claramente se presentan incrementos en los requerimientos de los cultivos de manera considerable, el cultivo que más incremento tiene en la demanda es el trébol, seguido por la avena y finalmente por el maíz. Los incrementos para el último tercio del siglo son del 44.37% (20369 m³/ha) para el trébol, 41.80% (9054 m³/ha) para el maíz y 27.92% (6625 m³/ha) para la avena (figura 5.49).

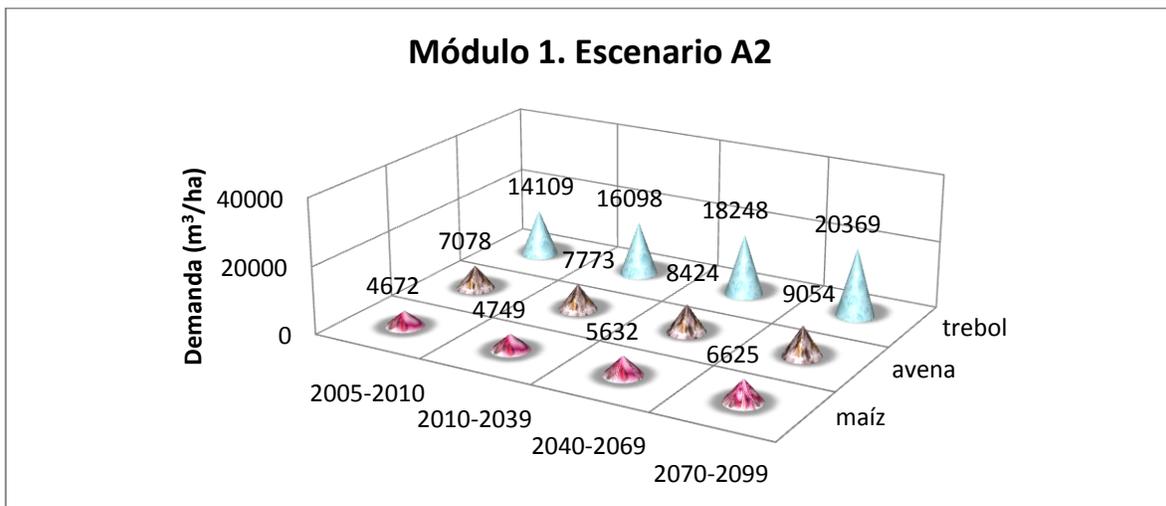


Figura 5.49 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 1 en base a la familia de escenarios A2.



La línea evolutiva A1B presenta incrementos en los tres cultivos de una manera muy similar a la línea evolutiva A2 e incluso mayores para los escenarios A1B 2010-2039, esto se debe al incremento más acelerado para estos años, para el escenario A2 2070-2099 los requerimientos de los cultivos son del 44.62% (20405 m³/ha) para el trébol, 47.82% (8773 m³/ha) para el maíz y 23.95% (6906 m³/ha) para la avena (figura 5.50).

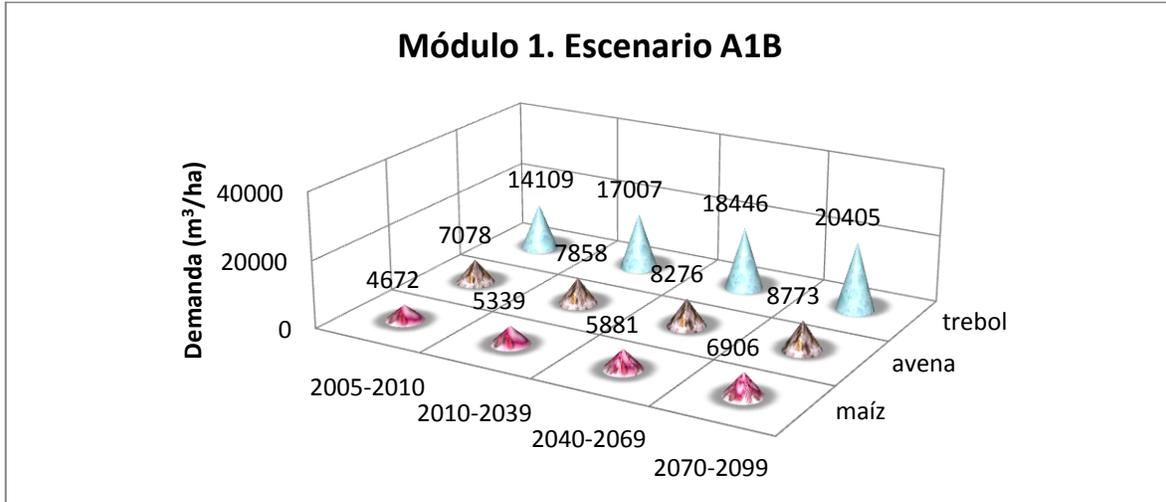


Figura 5.50 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 1 en base a la familia de escenarios A1B.

La línea evolutiva B1 para el Módulo 1 presenta los menores requerimientos de los cultivos que las otras dos líneas evolutivas, por lo tanto es la familia más optimista, sus incrementos son para el escenario B1 2010-2039 del 12.30% para el caso del trébol que es el más crítico, para el escenario B1 2040-2069 el trébol alcanza incrementos de 18.74% y para el último tercio del siglo alcanzan 23.77%, 20.23% y 9.48% para el trébol, avena y maíz respectivamente (figura 5.51).

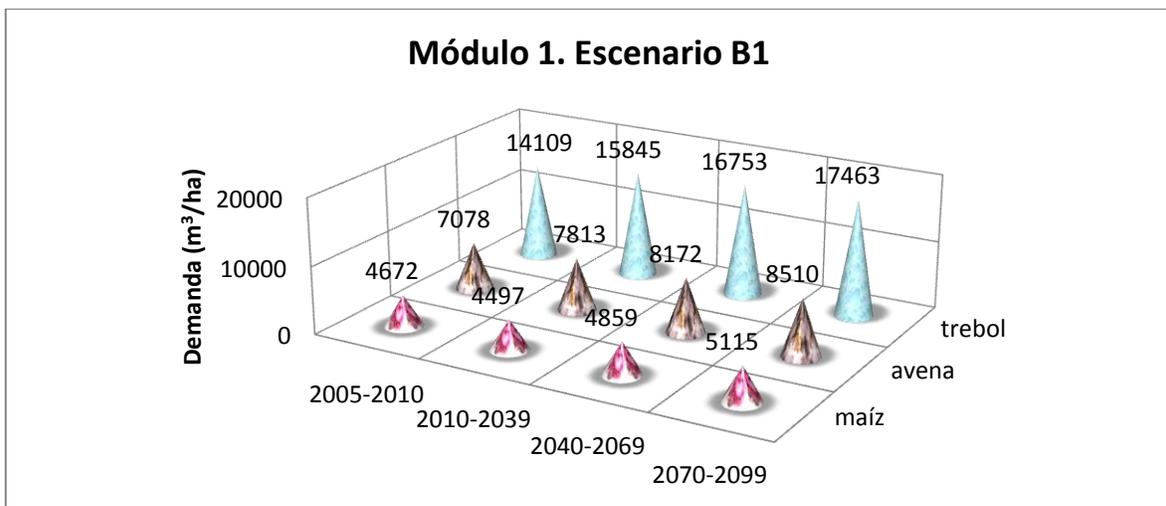


Figura 5.51 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 1 en base a la familia de escenarios B1.



El Módulo 2 solo cuenta con dos cultivos representativos, los cuales son el trigo y el maíz y tienen una demanda actual de 7560 (m³/ha) y 7323 (m³/ha) respectivamente (figura 5.52). Al igual que el Módulo 1 se incrementará a lo largo del tiempo con un crecimiento lento para el escenario 2010-2039, y posteriormente acelerándose para los escenarios A2 2040-2069 y A2 2070-2099, para este último los incrementos son del 34.83% para el trigo y del 24.53% para el maíz.

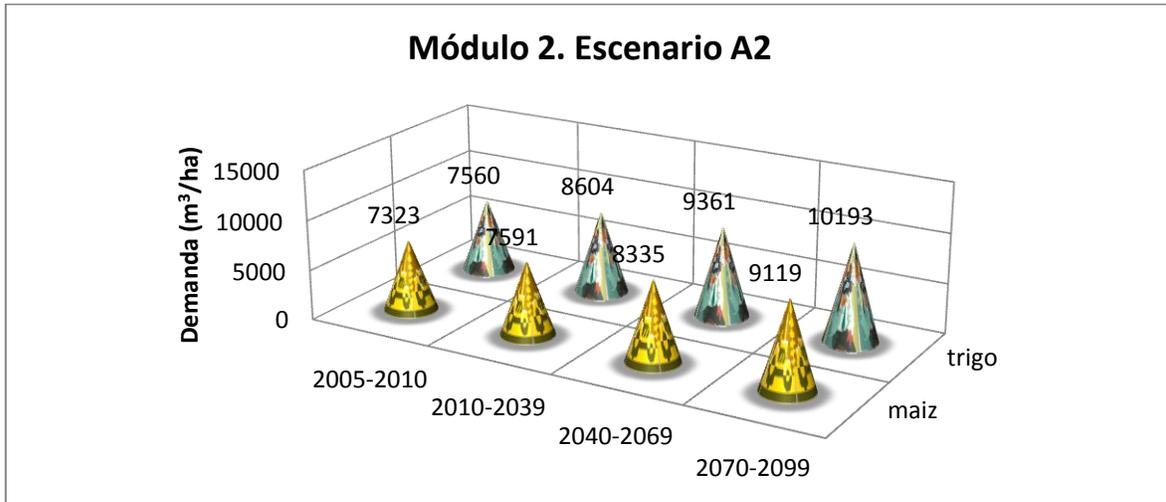


Figura 5.52 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 2 en base a la familia de escenarios A2.

El Módulo 2 para la línea evolutiva A1B presenta un crecimiento de la demanda más acelerado desde el escenario A1B 2010-2039 y la demanda evoluciona de manera similar a la línea evolutiva A2, esto es debido a que se está trabajando con temperaturas máximas y mínimas y como estas temperaturas tienen una mayor dispersión para este escenario en particular, los requerimientos del cultivo se incrementan. Para el escenario 2070-2099 se incrementa la demanda en un 29.17% para el maíz y un 36.83% para el trigo (figura 5.53).

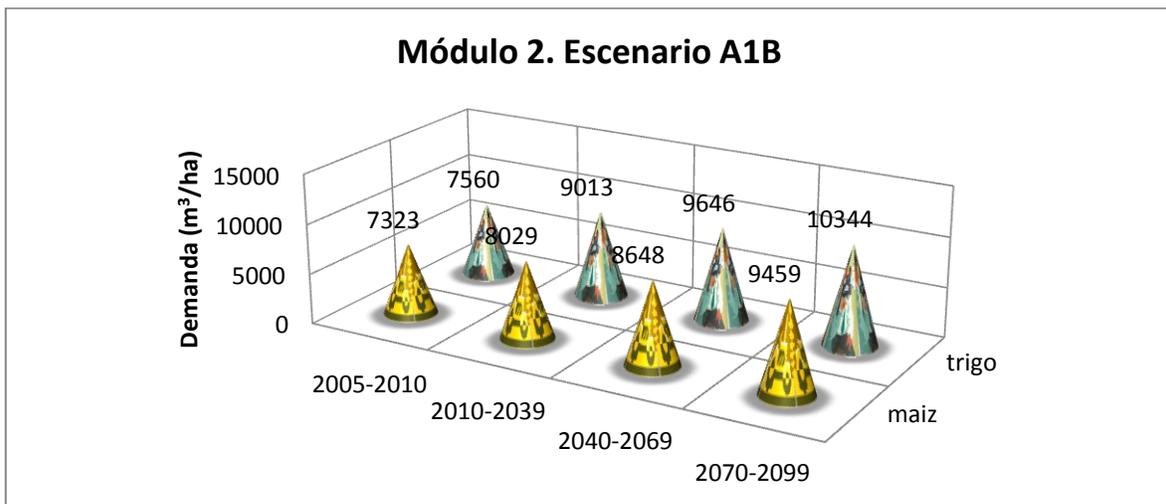


Figura 5.53 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 2 en base a la familia de escenarios A1B.



La línea evolutiva B1 para el Módulo 2 (figura 5.54) presenta los menores incrementos, para el escenario B1 2010-2039 se tienen incrementos solo del 2.87% para el maíz y del 14.23% para el trigo, para el escenario B1 2040-2069 los aumentos son del 7.72% y 19.79% para el maíz y el trigo respectivamente, y finalmente para el escenario 2070-2099 los incrementos son del 12.36% (8228 m³/ha) en el caso del maíz y del 25.98% en el caso del trigo (9524 m³/ha).

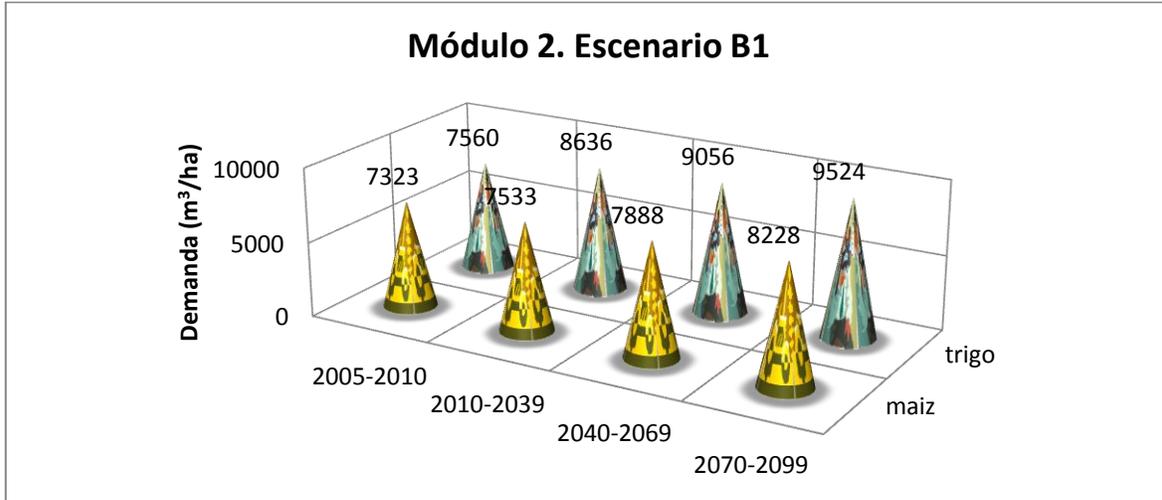


Figura 5.54 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 2 en base a la familia de escenarios B1.

El Módulo 3 cuenta con 6 cultivos, sus requerimientos actuales son los siguientes ordenados por el cultivo que requiere más agua (perenes): alfalfa con 17581 m³/ha, trigo con 9053 m³/ha, maíz 1 (marzo-junio) con 7699 m³/ha, avena con 7402 m³/ha, maíz 2 (julio-octubre) con 3954 m³/ha, sorgo con 5083 m³/ha, y garbanzo con 3389 m³/ha (figura 5.55).

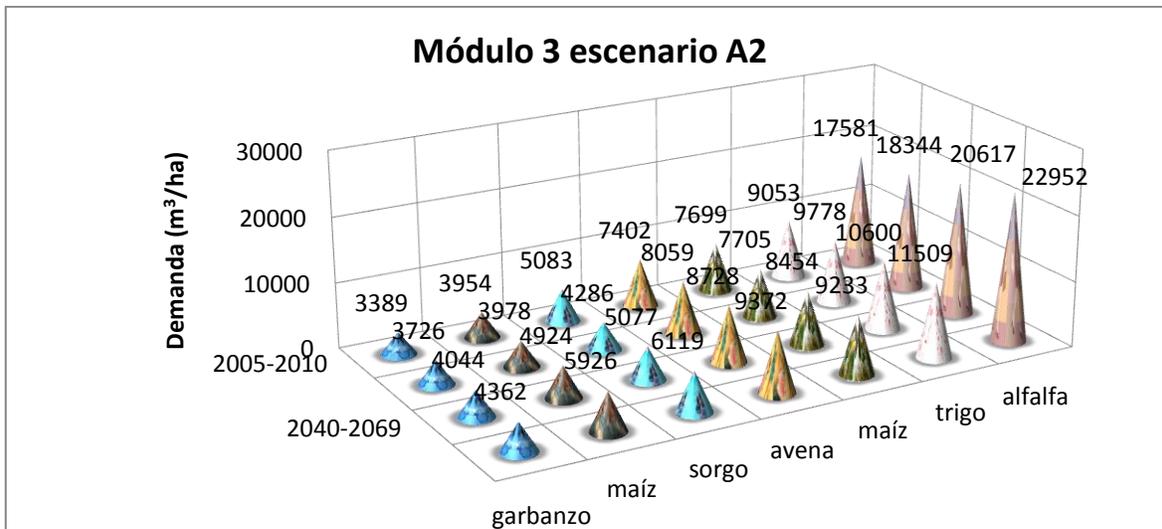


Figura 5.55 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 3 en base a la familia de escenarios A2.



Los requerimientos en los cultivos se incrementan para el escenario A2 2010-2039 hasta un 9.94% para el caso más crítico que es el garbanzo, para el escenario A2 2040-2069 el caso más crítico es el maíz 1 ya que se incrementa en un 24.53% y para el escenario 2070-2099 nuevamente el maíz 1 es el caso más crítico con un 49.87% en el incremento de la demanda, le sigue el alfalfa (30.55%), el garbanzo (28.71%), el trigo(27.13%), la avena (26.61%), el sorgo (20.38%) y el maíz 2 (19.92%).

La línea evolutiva A1B por su parte presenta incrementos mayores en algunos cultivos que el escenario A2 y en ocasiones menores debido a la dispersión de la temperatura en este escenario. El escenario A1B 2010-2039 presenta incrementos desde el 4.61% para el caso del maíz 2, hasta un 13.28% correspondiente al garbanzo, en este escenario es importante mencionar que debido a la dispersión del escenario incluso se reduce la demanda para sorgo en un 0.92%. En el escenario A1B 2040-2069 se tienen incrementos desde 9.64% (sorgo) hasta 28.12% (maíz 1). Para el final del siglo (2070-2099) se tienen incrementos del 17.71% para la avena y hasta el 63.78% en el caso de maíz 1 (figura 5.56).

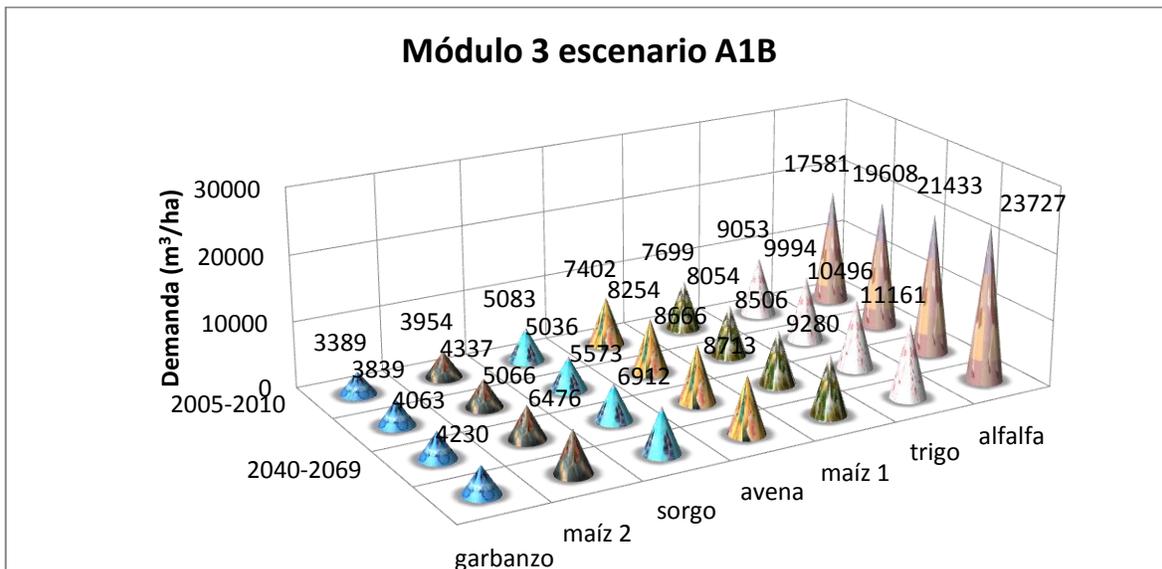


Figura 5.56 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 3 en base a la familia de escenarios A1B.

Las demandas menos críticas como ya hemos visto a lo largo del trabajo se presentan en el escenario la línea evolutiva B1 y para el Módulo 3 se presentan en el escenario 2010-2039 se dan los máximos incrementos en el garbanzo con un 10.56%, para el escenario B1 2040-2069 los máximos incrementos son igualmente en el garbanzo con un 15.55%. El escenario B1 2070-2099 presenta incrementos para el sorgo en un 5.71% con 5373 m³/ha y el más crítico se da en garbanzo nuevamente con un 21.25% con 4109 m³/ha (figura 5.57). Más sin embargo las demandas más importantes son en el alfalfa ya que es un cultivo perene y por lo tanto pequeños incrementos en porcentaje suelen ser grandes cantidades de agua.

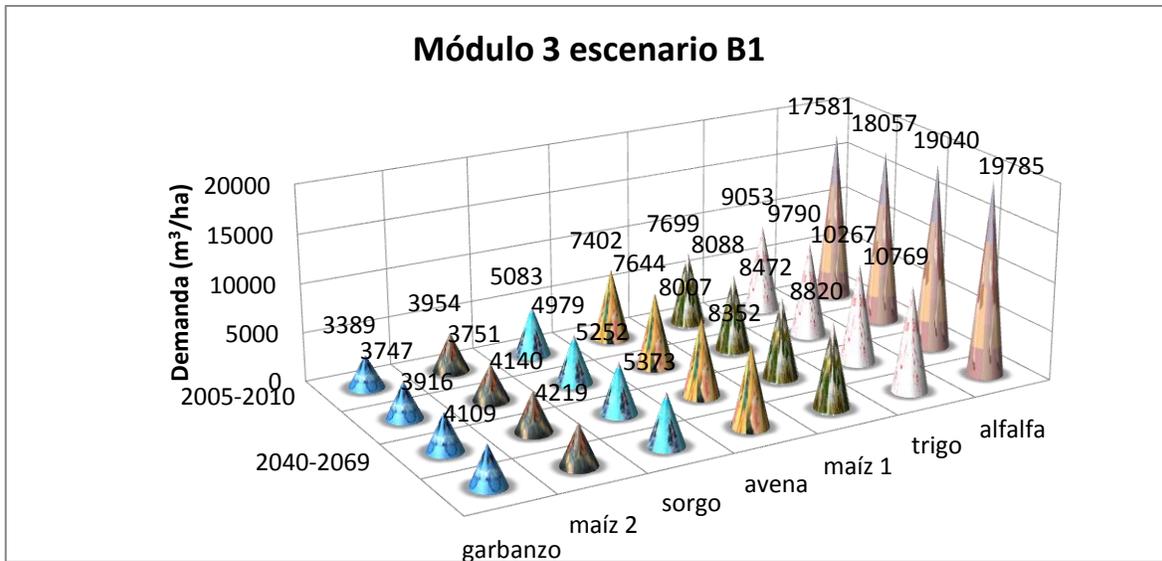


Figura 5.57 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 3 en base a la familia de escenarios B1.

La demanda del Módulo 4 está determinada por los siguientes cultivos ordenados de mayor a menor demanda por hectárea: alfalfa 17682 m³/ha (perene), trigo 9038 m³/ha, maíz 1 (marzo-junio) 7761 m³/ha, avena 7379 m³/ha, cebada 6602 m³/ha, sorgo 5156 m³/ha y maíz 2 (julio-octubre) 3996 m³/ha (figura 5.58). Los incrementos se dan del 3.96% para el sorgo hasta el maíz 2 27.28% para el escenario A2 2010-2039.

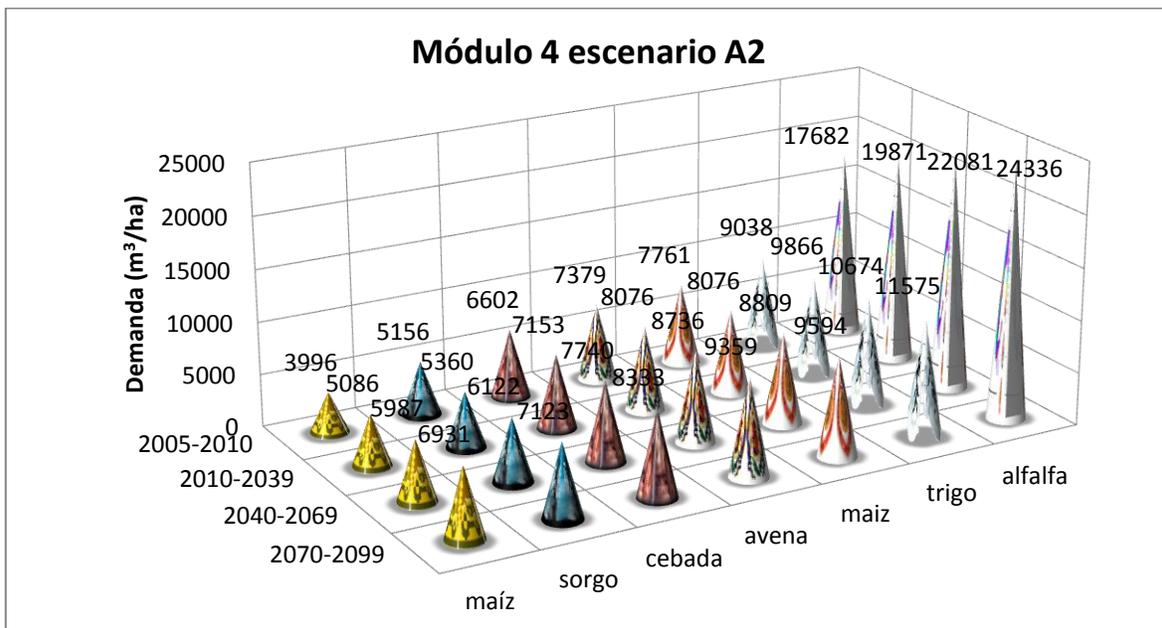


Figura 5.58 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 4 en base a la familia de escenarios A2.



En el escenario A2 2040-2069 los incrementos en la demanda se encuentran en un rango del 13.50% para el maíz 1 a 49.82% para el maíz 2. Para el escenario 2070-2099 se presentan los mismos cultivos con un rango de variación del 23.62% a 73.45%. Estos rangos varían para el mismo cultivo más sin embargo debemos recordar los meses en los que se está realizando cada cultivo, en el caso del maíz 1 se da en los meses más calurosos y donde la precipitación es escasa más sin embargo en los escenarios estos meses se tiene un incremento de precipitación, a comparación del maíz 2 se da principalmente en los meses donde llueve, más sin embargo debido al cambio climático son los meses más afectados por tales motivos se tienen variaciones importantes en los resultados.

La línea evolutiva A1B por su parte, para el Módulo 4 se presentan variaciones con respecto a la línea evolutiva A2 para la mayoría de los cultivos es menor para el presente escenario. En este caso el cultivo más crítico es el maíz 2 y el menos crítico es el maíz 1 para los tres escenarios. En el escenario A1B 2010-2039 el rango es de 8.16% a 36.49%, en el caso del escenario A1B 2040-2069 es de 11.45% a 45.60% y para el escenario 2070-2099 es de 21.60% incrementándose de 7761 m³/ha hasta 9437 m³/ha y para el maíz 2 incrementándose un 71.77% de 3996 m³/ha hasta 6864 m³/ha (figura 5.59).

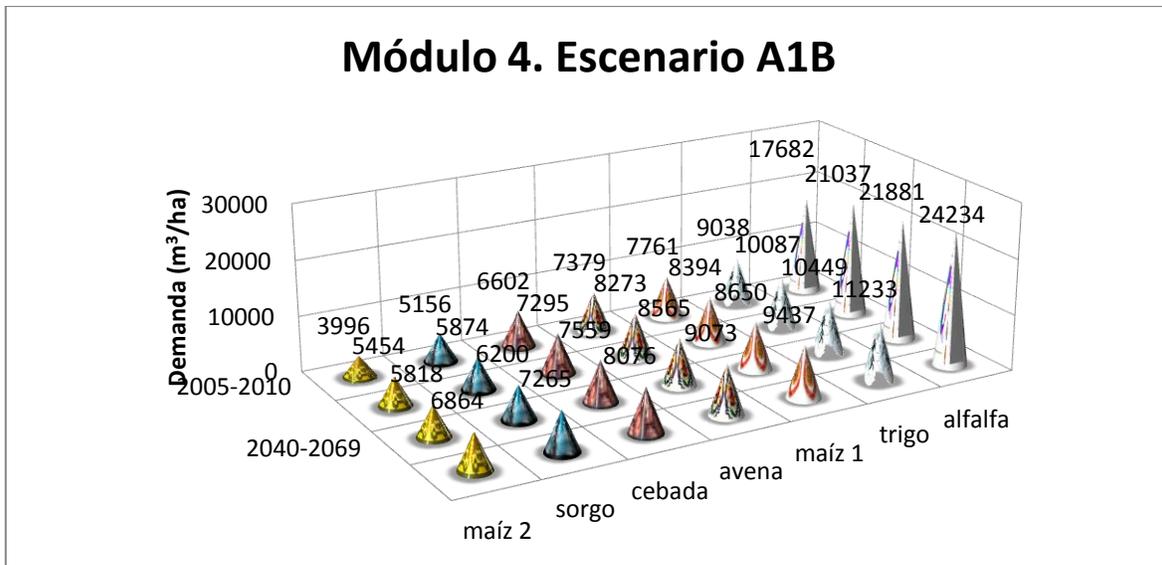


Figura 5.59 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 4 en base a la familia de escenarios A1B.

La línea evolutiva B1 para el Módulo 4 presenta los menores incrementos en la demanda, alcanzando un máximo incremento de 35.19%. Para el escenario B1 2010-2039 (figura 5.60) la demanda se incrementa en un rango del 3.30% (maíz 1) a 22.22% (maíz 2). En el caso del escenario B1 2040-2069 la demanda de los diferentes cultivos se encuentra en un rango de 5.47% (sorgo) a 30.78% (maíz 2). Finalmente para finales de siglo (B1 2070-2099) el rango se encuentra en 10.74% (sorgo) a 35.19% (maíz 2), donde este último se incrementa de 3996 m³/ha hasta 5402 m³/ha.

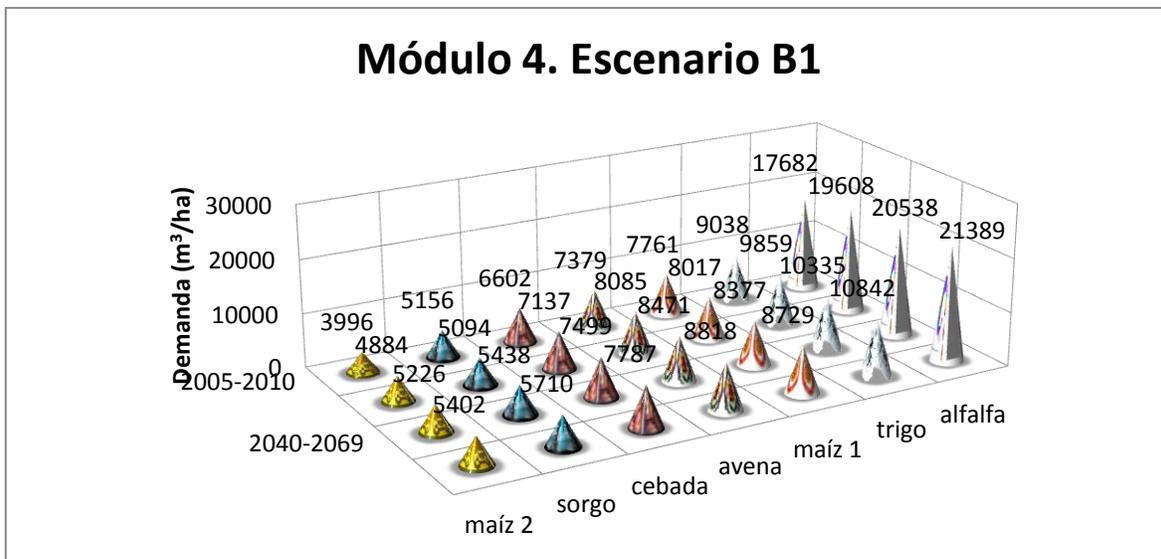


Figura 5.60 Requerimiento de agua para los diferentes cultivos del Módulo 4 en base a la familia de escenarios B1.

5.5.8 Requerimientos de los Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Debido a que las demandas agrícolas consideradas para la gestión del sistema de explotación del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro están consideradas por Módulos, de la misma manera se agruparán para observar el incremento de la demanda para los diferentes Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. Las demandas agrícolas para nuestro caso constan de 2 a 6 cultivos como se vio en la figura 5.48. A continuación analizaremos el incremento en las demandas brutas por Módulo. Recordemos que el volumen bruto se calcula multiplicando el volumen neto por el inverso de la eficiencia, por el número de hectáreas y por el porcentaje de hectáreas regadas, que es un resultado del programa CROPWAT. De esta manera podremos conocer el volumen bruto que se debería estar entregando a cada uno de los canales de conducción.

$$Vol_B = \frac{f_A * A * Vol_{ha}}{n} = \frac{Vol_n}{n}$$

Donde:

- Vol_B = Volumen Bruto (hm^3)
- f_A = Factor de área regada (adimensional)
- A = Área total irrigada (ha)
- Vol_{ha} = Volumen por hectárea (hm^3/ha)
- Vol_n = Volumen neto (hm^3)
- n = eficiencia (adimensional)

En la (tabla 5.14) se muestran los resultados anuales para cada Módulo, es importante mencionar que este análisis se realizó a escala mensual y en la tabla solo se muestra un resumen de los resultados obtenidos.



DR 020 M-Q	m ³ /ha	f área (%)	Área (ha)	Vol. Neto (hm ³)	Eficiencia (%)	Vol. Bruto (hm ³)
Módulo 1	13970.88	88.50	299	3.70	58.91	6.272
Módulo 2	12260.16	92.92	199	2.27	59.02	3.841
Módulo 3	16692.48	62.25	3025	31.44	57.57	54.603
Módulo 4	17133.12	53.08	1482	13.48	57.23	23.549

Tabla 5.14. Volúmenes Netos y Brutos anuales para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Para los escenarios de cambio climático se consideró que se mantenían sembrando la misma cantidad de hectáreas, por lo tanto el incremento de la demanda es únicamente debido al cambio climático siendo más extremas la insolación y la velocidad del viento, a su vez que disminuía la humedad relativa del suelo.

5.5.8.1 Resultados para la demanda actual y futura

La demanda actual para el Módulo 1 que es abastecida por gravedad para los años 2005-2010 es de 6.272 hm³/año, esta demanda se incrementará debido al cambio climático afectando en mayor medida los meses que se demanda la mayor cantidad de agua que concuerdan con los meses más cálidos y en los que la precipitación es escasa (marzo-mayo). Para el escenario A2 2010-2039 la demanda se incrementa en un 10.75% alcanzando los 6.946 hm³, para el escenario A2 2040-2069 se incrementa en un 21.62% llegando a 7.628 hm³ y para el escenario A2 2070-2099 se incrementa en un 31.67% alcanzando los 8.259 hm³. En la figura 5.61 Se presenta la evolución de la demanda mensual correspondiente al Módulo 1 para la familia de escenarios A2.

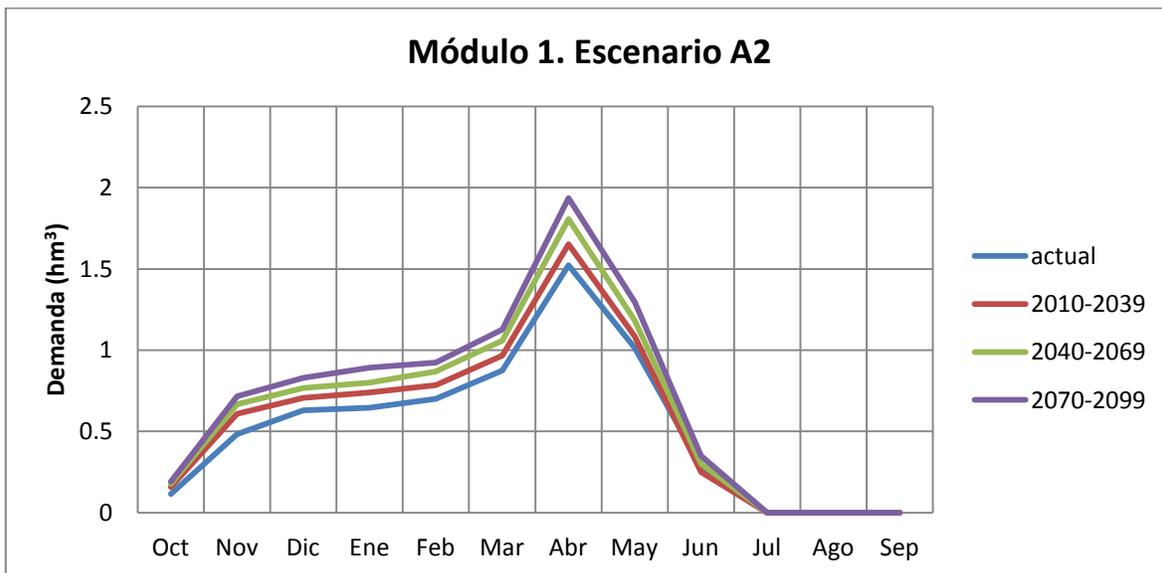


Figura 5.61 Incremento en la demanda del Módulo 1 para los 3 escenarios A2.

La línea evolutiva A1B (figura 5.62) presenta una evolución más acelerada para el escenario A1B 2010-2039 que la línea evolutiva A2, más sin embargo para los escenarios siguientes la presente familia evoluciona de manera menos significativa. La figura 5.62 muestra la evolución de la



demanda mensual para la familia de los escenarios A1B. En el escenario A1B 2010-2039 la demanda se incrementa en un 13.31%, en lo que corresponde al escenario A2 2040-2069 aumenta en un 20.84% y para el escenario A2 2070-2099 se incrementa en un 29.09% alcanzando los 8.097 hm³.

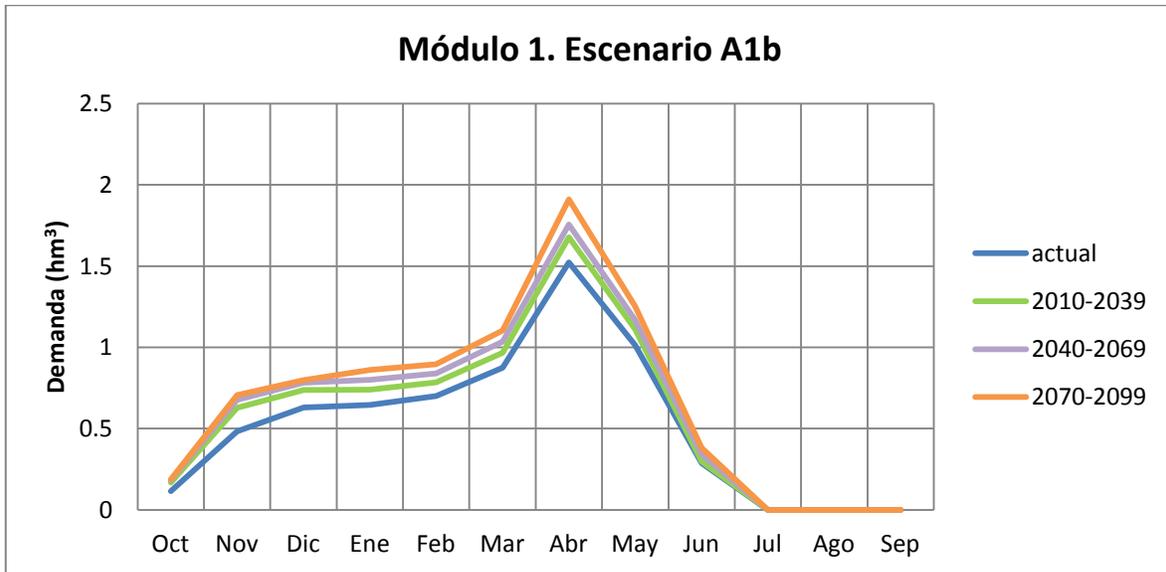


Figura 5.62 Incremento en la demanda del Módulo 1 para los 3 escenarios A1B.

La línea evolutiva B1 también presenta un incremento rápido para el escenario B1 2010-2039, donde se presenta un aumento en la demanda del 10.52% similar a la línea evolutiva A2, más sin embargo para el segundo (B1 2040-2069) y tercer tercio del siglo (B1 2070-2099) la demanda aumenta más lentamente incrementándose en 15.84% y 22.13% respectivamente y llegando a los 7.66 hm³ en su demanda anual para el escenario B1 2070-2099 (figura 5.63).

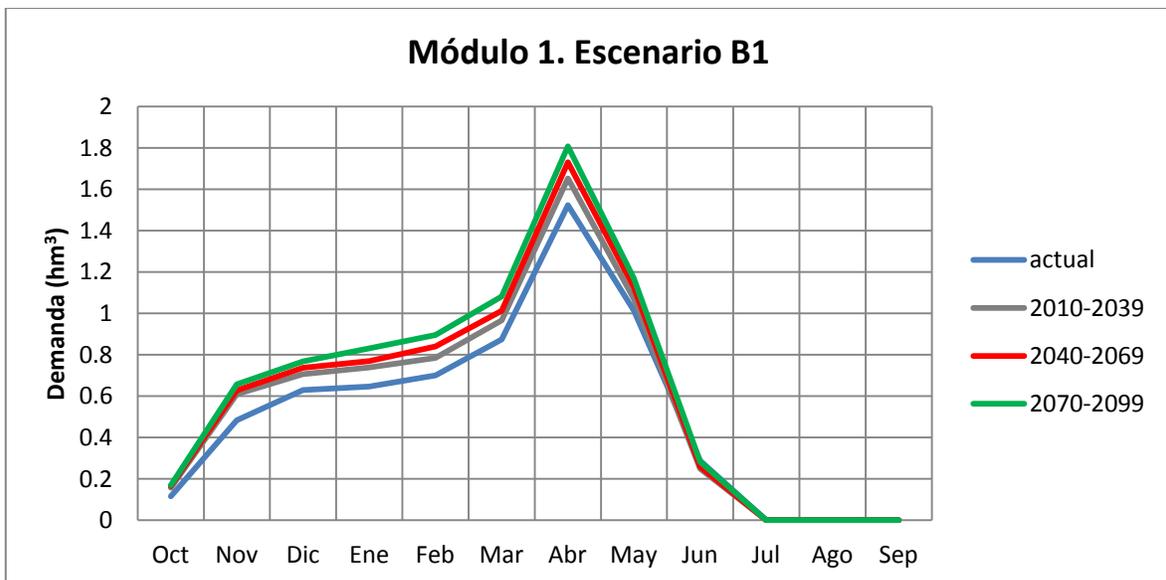


Figura 5.63 Incremento en la demanda del Módulo 1 para los 3 escenarios B1.



El Módulo 2 suministrado solamente superficialmente es el que menor cantidad de agua demanda en la actualidad con 3.84 hm³ al año. Esta demanda se incrementará en menor medida que la demanda del Módulo 1, los factores dependen la variabilidad climática espacialmente, como los tipos de cultivo y la precipitación en la zona. La demanda se incrementa en un 5.26% para el escenario A2 2010-2039, 13.94% para el escenario A2 2040-2069 y 23.31% para el escenario A2 2070-2099, llegando la demanda hasta los 4.74 hm³/año. En la figura 5.64 podemos ver la evolución mensual de la demanda para la familia de los escenarios A2 donde el aumento en la demanda es más notorio en los meses de marzo, abril y mayo.

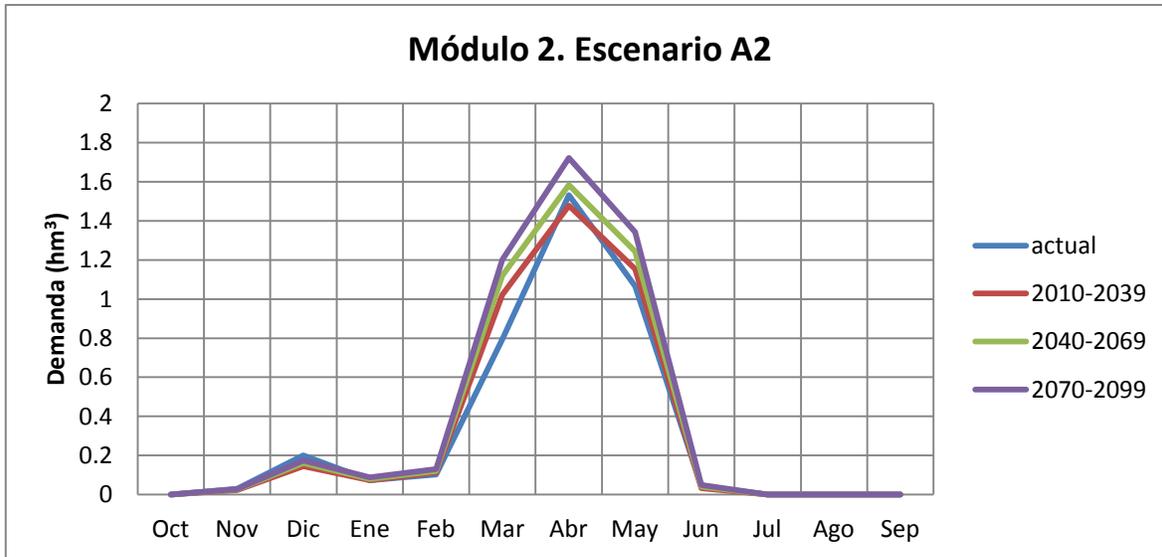


Figura 5.64 Incremento en la demanda del Módulo 2 para los 3 escenarios A2.

Los incrementos en la demanda para el Módulo 2 correspondientes a la línea evolutiva A1B presentan incrementos por encima de la línea evolutiva A2, estos resultados son debido a que las temperaturas máximas y mínimas para este escenario son más extremas que en los escenarios A2.

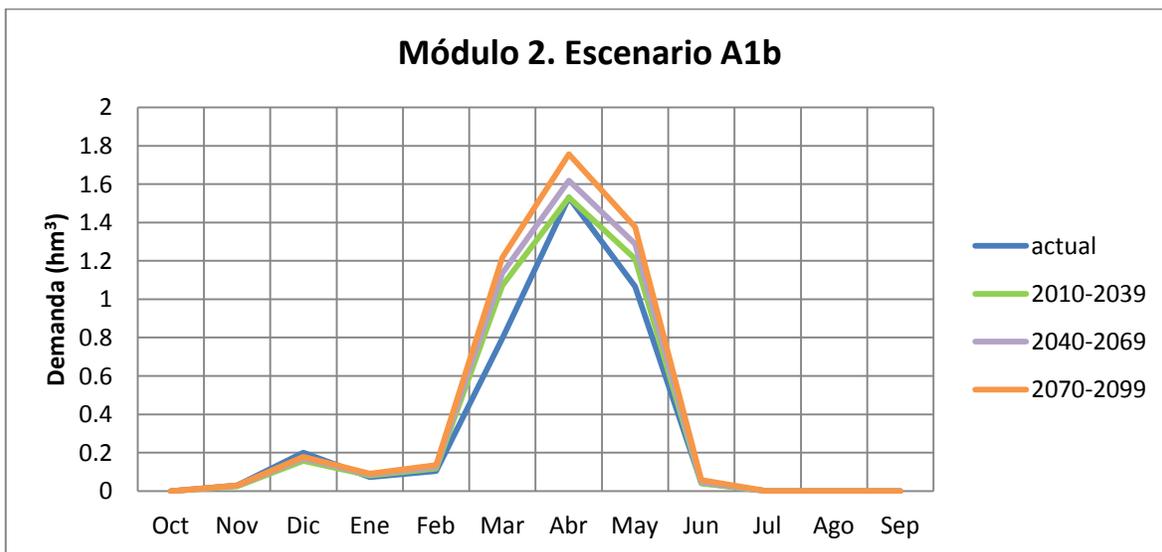


Figura 5.65 Incremento en la demanda del Módulo 2 para los 3 escenarios A1B.



En la figura 5.65 podemos observar los cambios más importantes, los cuales se dan en los meses de marzo a mayo. Los incrementos en promedio anual son del 10.14%, 17.06% y 26.07% para los escenarios A1B 2010-2039, A1b 2040-2069 y A1B 2070-2099 respectivamente, alcanzando la demanda para finales de siglo los 4.842 hm³/año (figura 5.65).

La línea evolutiva B1 es la que presenta los menores cambios tal y como se puede apreciar en la figura 5.66 donde se observa que los incrementos no son tan importantes como en las otras dos líneas evolutivas, incluso para el mes de diciembre se puede observar que hay decrementos en la demanda. En promedio anual los incrementos alcanzan para el escenario B1 2010-2039 un 4.95%, para el escenario B1 2040-2069 el aumento en la demanda es del 10.14% y 14.05% en el caso del escenario 1 2070-2099, para este último escenario la demanda asciende en 0.54 hm³.

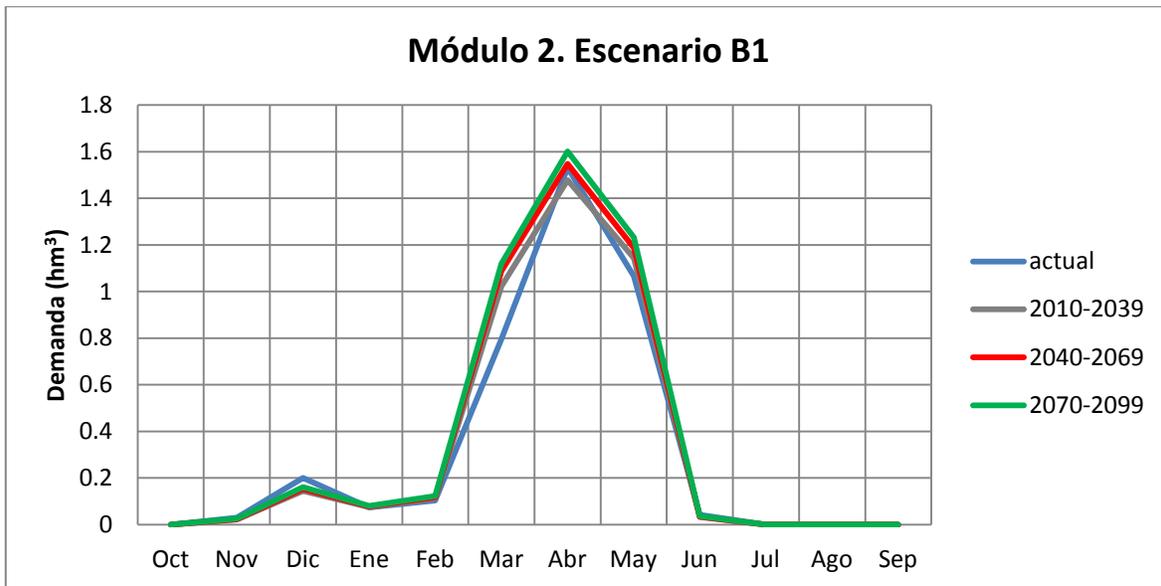


Figura 5.66 Incremento en la demanda del Módulo 2 para los 3 escenarios B1.

El Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro es el que mayor cantidad de agua demanda, por lo tanto a pesar de que en porcentaje no se incremente demasiado, en volumen sí lo será. Este Módulo demanda anualmente 54.603 hm³ y donde los meses en los que se presentan incrementos importantes son desde los meses de diciembre-mayo (figura 5.67).

Para el escenario A2 2010-2039 se estiman incrementos del 7.27%, 16.81% para el escenario A2 2040-2069 y para el escenario A2 2070-2099 se estiman incrementos del 26.91%, es decir incrementos de 14.692 hm³ con una demanda anual de 69.295 hm³.

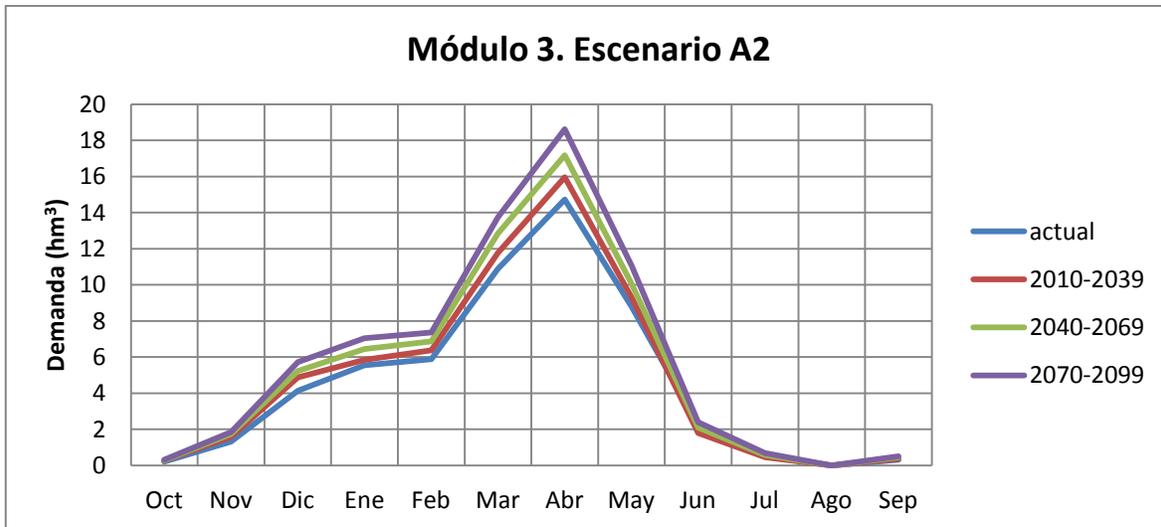


Figura 5.67 Incremento en la demanda del Módulo 3 para los 3 escenarios A2.

En lo que refiere a la línea evolutiva A1B para el Módulo 3 la demanda es mayor para el escenario A1B 2010-2039, más sin embargo para los escenarios para el segundo y tercer tercio del siglo esta es ligeramente menor que para la línea evolutiva A2. Los incrementos para el escenario A1B 2010-2039 son del 10.82%, en el caso del escenario A1B 2040-2069 los incrementos son del 17.59% y 25.02% para el escenario A1B 2070-2099, esto corresponde a 13.663 hm³, lo cual a pesar que es menor que en la familia de los escenarios A2, es muy importante este incremento en la demanda (figura 5.68).

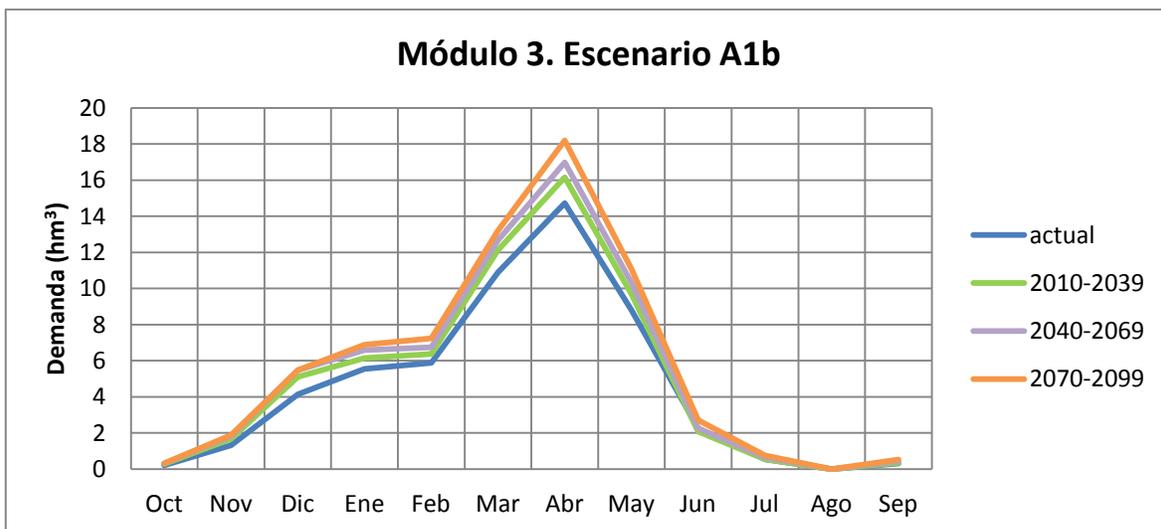


Figura 5.68 Incremento en la demanda del Módulo 3 para los 3 escenarios A1B.

La línea evolutiva B1 para este Módulo estima los menores incrementos en la demanda que las otras dos líneas evolutivas. Los incrementos para el escenario B1 2010-2039 son de 3.88 hm³ (10.82%), en el caso del escenario B1 2040-2069 los incrementos son de 7.04 hm³ (17.59%) y 9.715 hm³ (25.02%) para el escenario B1 2070-2099. A pesar de que es el escenario con menor



incremento en la demanda, está sigue siendo importante y el rendimiento de los cultivos puede descender de manera importante, debido a el estrés hídrico que se presente en los cultivos. En la figura 5.69 se muestra la evolución mensual donde el mes más afectado es el mes de abril con un incremento en la demanda de 2.67 hm³ para el escenario crítico.

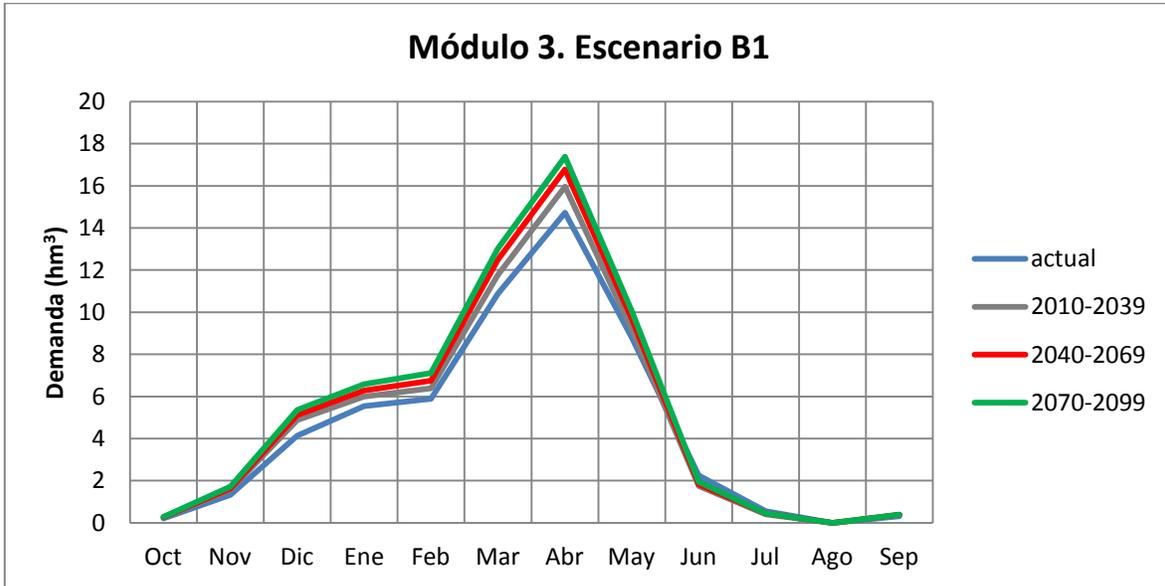


Figura 5.69 Incremento en la demanda del Módulo 3 para los 3 escenarios B1.

El Módulo 4 es el segundo Módulo más grande tan solo detrás del Módulo 3, tiene una demanda en promedio anual para los años 2005-2010 de 23.549 hm³, viéndose mayormente incrementada en los meses de diciembre a mayo donde los incrementos son mayores a los 0.45 hm³/mes para las tres líneas evolutivas en el caso de los años 2070-2099 (figura 5.70).

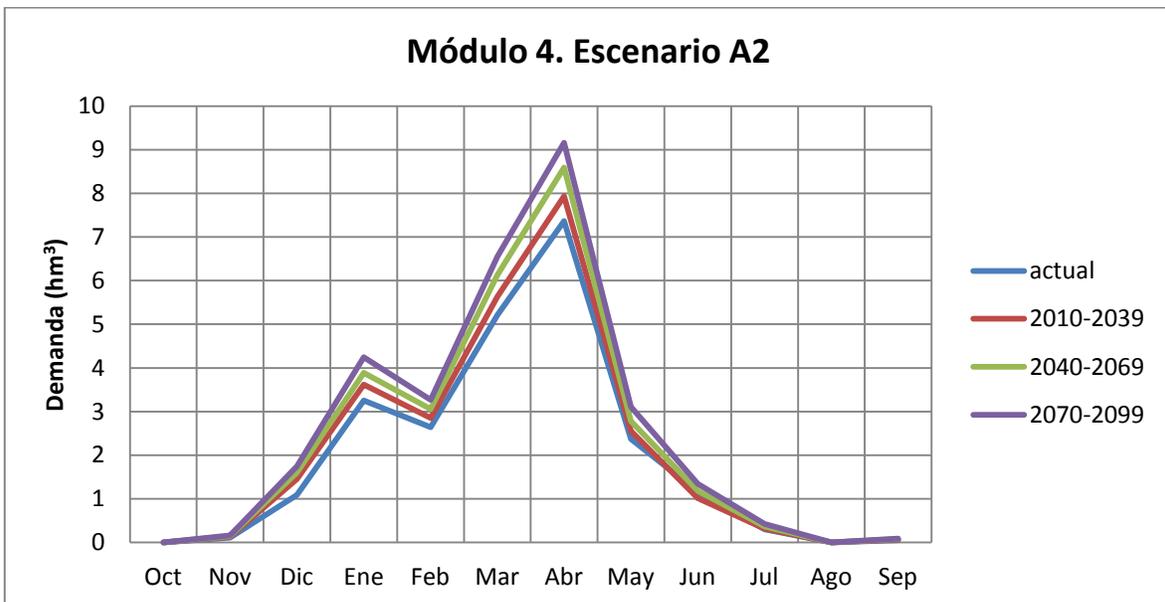


Figura 5.70 Incremento en la demanda del Módulo 4 para los 3 escenarios A2.



Los incrementos son para la línea evolutiva A2 son de 8.59% para el escenario A2 2010-2039 incrementándose la demanda actual en 2.02 hm³, en el caso del escenario A2 2040-2069 el incremento es del 18.11% (4.26 hm³) y para el escenario A2 2070-2099 el aumento es del 27.82%, la demanda anual asciende a los 30.1 hm³/año, y donde el mes con el mayor demanda en el es abril con 1.8 hm³.

Los incrementos para la línea evolutiva A1B a escala mensual para el Módulo 4 se encuentran ilustrados en la figura 5.71 y donde los incrementos para el escenario A1B 2010-2039 son en promedio anual del 11.72%, 15.81% en el caso del escenario A1B 2040-2069 y para el último tercio del siglo (A1B 2070-2099) los incrementos son del 24.48%, es decir 5.765 hm³, donde el mes más afectado es el mes de abril con ascensos de 1.555 hm³.

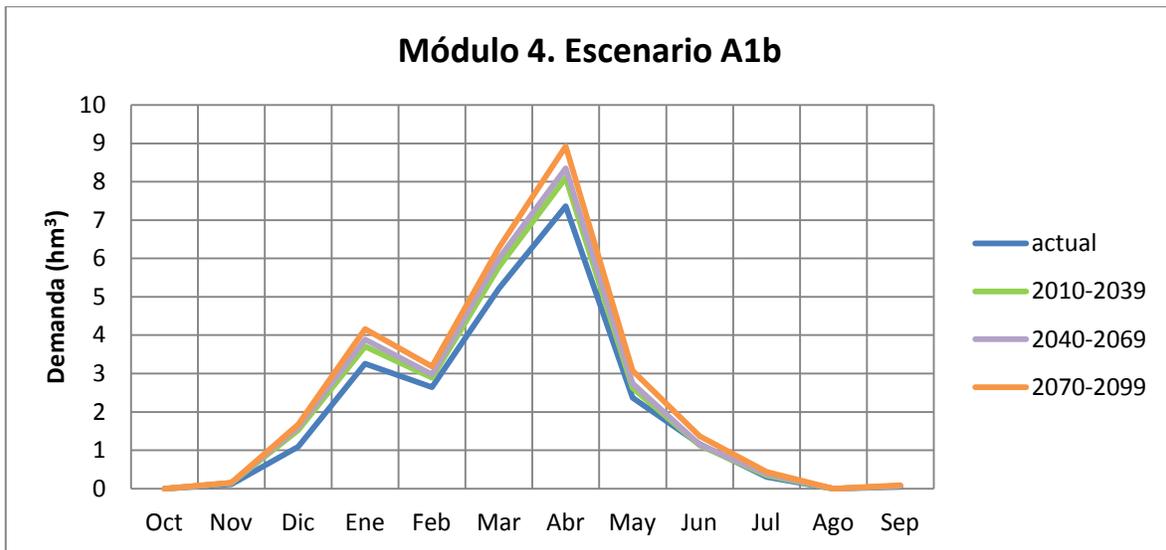


Figura 5.71 Incremento en la demanda del Módulo 4 para los 3 escenarios A1B.

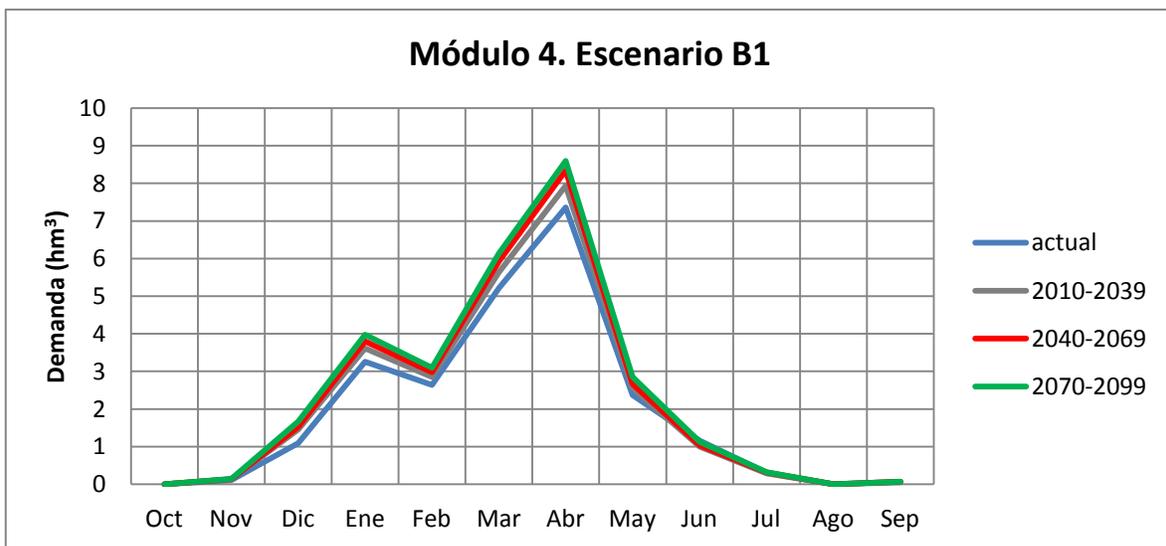


Figura 5.72 Incremento en la demanda del Módulo 4 para los 3 escenarios B1.



La línea evolutiva B1 presenta incrementos del 8.41% para el escenario B1 2010-2039, 13.70% (1.981 hm³), para el escenario B1 2040-2069 y 18.82% (3.227 hm³), en el caso del escenario B1 2070-2069 (4.432 hm³), incrementándose la demanda hasta los 27.981 hm³/año. En comparación con las otras dos familias es el que presenta los resultados más optimistas y donde los incrementos de la demanda son menores en hasta más de 2 hm³ en comparación con el escenario A2 2070-2099 (figura 5.72).

5.5.9 Salidas naturales del Acuífero

Al disminuir la precipitación disminuye la recarga, y al disminuir la recarga al acuífero los niveles piezométricos descienden. Lo que implica que las salidas que se presentan naturalmente en el acuífero disminuyan, en el presente estudio se analizaron las salidas naturales por evapotranspiración, las salidas naturales por manantiales y las salidas naturales al lago de Cuitzeo.

Salidas por evapotranspiración. Dependen del nivel estático del acuífero, si este se encuentra a menos de 10 m de profundidad, en este rango se considera que hay salidas naturales por evapotranspiración, para nuestro caso la zona donde los niveles se encontraban a menos de 10 metros es en las zonas aledañas al lago de Cuitzeo. En la actualidad se consideraron salidas por evapotranspiración de 64.2 hm³ y esta disminuye a lo largo de los años para los diferentes escenarios propuestos debido al descenso de los niveles piezométricos viéndose mayormente afectadas en la línea evolutiva, y donde para el último tercio del siglo (A2 2070 2099) las salidas por evapotranspiración se dejarían de presentar. La tabla 5.17 muestra la disminución de las salidas por evapotranspiración en promedio anual para los nueve escenarios analizados y en donde la línea evolutiva más crítica es la A2, seguida de la línea evolutiva A1B y finalmente la línea evolutiva B1.

años	A2	A1b	B1
2010-2039	32.10	35.10	38.10
2040-2069	10.70	11.70	12.70
2070-2099	0.00	1.30	2.54

Tabla 5.17 Salidas naturales por evapotranspiración para el acuífero Morelia-Queréndaro en hm³/año.

Salidas por manantiales. Están relacionadas con la recarga al acuífero, esto se debe principalmente a que en algunas zonas del acuífero se presentan semiconfinamientos, lo que hace que en algunas zonas se encuentren acuíferos colgados, como es el caso del manantial la Mintzita y otros manantiales que se encuentran en el acuífero Morelia-Queréndaro. De algunos de estos manantiales se extrae agua para los diferentes usos siendo el manantial la Mintzita el más importante y para este, y otros manantiales el volumen que desalojan naturalmente se reducirá de manera importante debido al cambio climático.

El volumen desalojado por manantiales es de 9.324 hm³/año, volumen que disminuirá debido al cambio climático para las tres líneas evolutivas siendo la más crítica la línea evolutiva A2, seguida



de la A1B y finalmente la más optimista B1. En la tabla 5.18 se puede observar el decremento para el escenario A2 2070-2099 donde se reduce en aproximadamente un 30%.

años	A2	A1b	B1
2010-2039	7.69	9.06	8.62
2040-2069	6.67	8.72	8.24
2070-2099	6.47	8.26	8.81

Tabla 5.18 Salidas naturales por manantiales para el acuífero Morelia-Queréndaro en $hm^3/año$.

Salidas al lago. Son principalmente por la conexión del acuífero con el lago de Cuitzeo, es decir el volumen que desaloja el acuífero al lago de Cuitzeo, más sin embargo debido a la sobreexplotación del acuífero y a que los niveles piezométricos descienden, la conexión con el acuífero disminuye para los diferentes escenarios analizados. Para el periodo actual las salidas anuales al lago son de $3.3 hm^3/año$ en promedio.

La línea evolutiva A2 para los años 2040-2069 estima que se perderá la conexión con el acuífero, a diferencia del escenario A1B donde las salidas al lago son pocas, más sin embargo no se pierde la conexión. En el caso de la línea evolutiva B1 presenta el caso más crítico para los años 2040-2069, más sin embargo debido al incremento en las recargas para los años 2070-2099 la conexión con el acuífero se recupera de manera importante. En la tabla 5.19 se muestran los resultados completos para las tres líneas evolutivas.

años	A2	A1b	B1
2010-2039	1.74	2.12	2.07
2040-2069	0.00	0.84	0.80
2070-2099	0.00	0.79	1.19

Tabla 5.19 Salidas naturales al lago de Cuitzeo para el acuífero Morelia-Queréndaro en $hm^3/año$.

5.6 Incremento en la población y la demanda urbana

Para la proyección de la población en el acuífero se utilizó el programa DATOS BASICOS desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. CONAGUA, con este software podemos hacer la proyección para los años 2010-2099, los métodos disponibles para realizar el cálculo son:

-  Método de crecimiento por comparación.
-  Método de mínimos cuadrados lineal (A1B y B1).
-  Método de mínimos cuadrados exponencial.
-  Método de mínimos cuadrados logarítmico (A2).
-  Método de mínimos cuadrados Potencial.

El incremento de la población para el acuífero con estos métodos se observa en la figura 5.73 donde se puede observar que el incremento de la población por los métodos exponencial y



potencial tienen un crecimiento de población muy acelerado además de que la CONAPO estima el incremento de la población similares a los métodos lineal y logarítmico aquí analizados. Por lo tanto se decidió trabajar con el método lineal para el escenario A2 y con el método logarítmico para los escenarios A1B y B1.

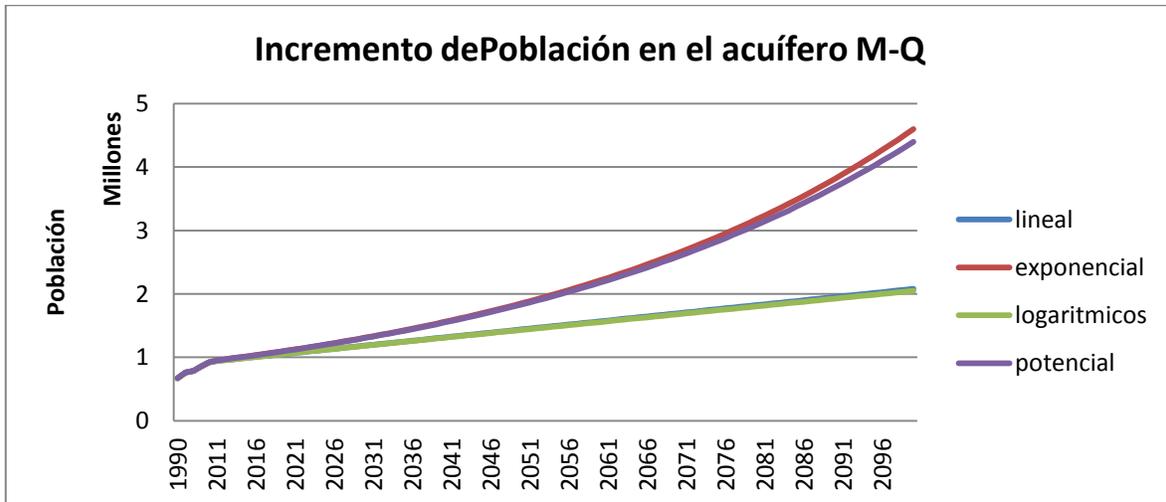


Figura 5.73 Incremento de la población en el acuífero Morelia-Queréndaro calculada por diferentes métodos con el programa “DATOS BASICOS”.

Analizando la proyección del escenario A2 podemos observar que el incremento de la población para el acuífero Morelia-Queréndaro (figura 5.74) presenta una tendencia ascendente incrementándose la población de 919,811 personas hasta los 2,133,757 esto es más del doble de la población. Para los escenarios correspondientes a esta línea evolutiva se realizó un promedio de la población para cada escenario (30 años) teniendo incrementos del 21.26% para el escenario A2 2010-2039 y hasta los 108.39% para el escenario A2 2070-2099. En la tabla 5.15 se muestra tanto el incremento de la población como el incremento de la demanda para los diferentes escenarios.

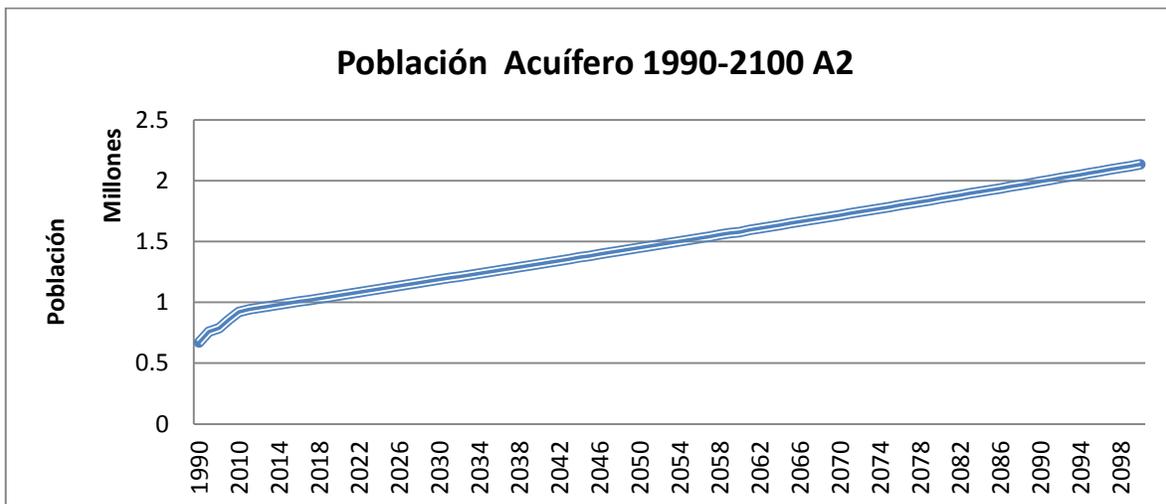


Figura 5.74 Incremento de la población en el acuífero Morelia-Queréndaro mediante el escenario A2 1990-2100.



La demanda urbana presenta incrementos debido a la creciente población y con lo cual el sistema superficial y subterráneo se verán mayormente demandados, para esto se realizó una correlación entre las personas que hay en la actualidad y el volumen de agua suministrado anualmente y de esta manera poder conocer la demanda que se pueda presentar en los diferentes escenarios. En el caso de la línea evolutiva A2 los resultados se encuentran en la tabla 5.15, donde se pueden observar los incrementos más críticos se dan obviamente a finales del siglo, donde la demanda se duplica prácticamente para todos los bombeos considerados.

Año	Población	Incremento (%)	Otros bombeos (hm ³)	Morelia Subterráneo (hm ³)	Mintzita (hm ³)	Morelia Superficial (hm ³)
2010	919811	0.00%	126.11	30.00	31.10	20.88
2010-2039	1115346	21.26%	152.92	36.38	37.72	25.32
2040-2069	1508830	64.04%	206.87	49.21	51.02	34.25
2070-2099	1916763	108.39%	262.79	62.52	64.82	43.51

Tabla 5.15 Incremento de la población y de las diferentes demandas para el acuífero Morelia-Queréndaro

Para las líneas evolutivas A1B y B1 los escenarios de cambio climático consideran un incremento de la población alcanzando el punto máximo a mediados del siglo para posteriormente tener una disminución en la población, por lo tanto al tener la ecuación que estima el crecimiento de la población podemos conocer tanto los incrementos como las disminuciones para las líneas evolutivas (figura 5.75).

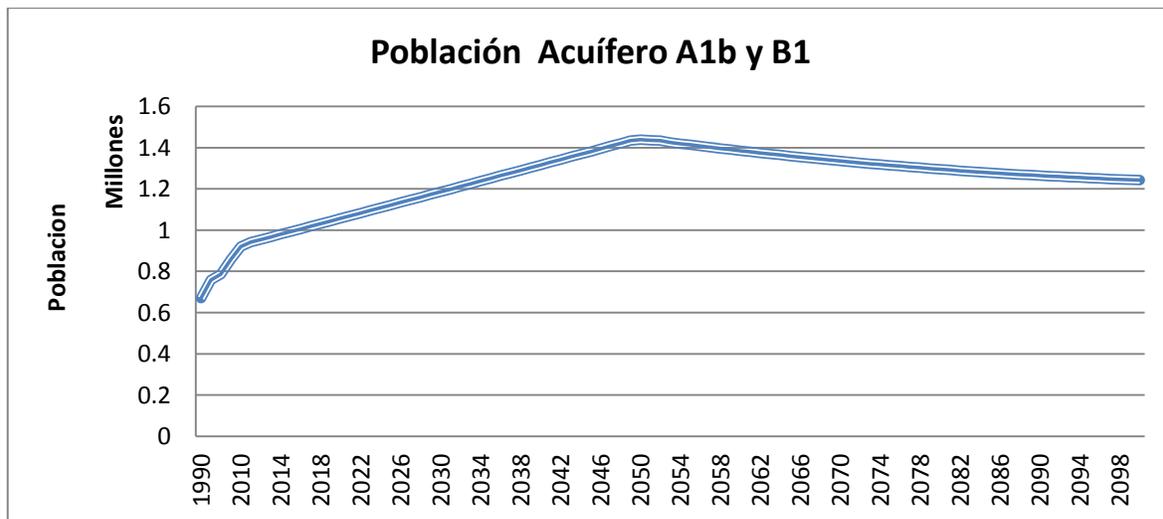


Figura 5.75 Incremento de la población para el acuífero Morelia-Queréndaro mediante los escenarios A1B y B1.

El incremento de la demanda para estas dos líneas evolutivas al igual que la población alcanzará la mayor demanda a mediados de siglo, más sin embargo los incrementos son menores que en la línea evolutiva A2, podemos observar que la demanda se incrementa más de la mitad para la



totalidad de las demandas al sistema. En la tabla (5.16) podemos ver la evolución de la demanda para las líneas evolutivas A1B y B1 para el acuífero Morelia-Queréndaro.

Año	Población	Incremento (%)	Otros bombeos (hm ³)	Morelia Subterráneo (hm ³)	Mintzita (hm ³)	Morelia Superficial (hm ³)
2010	919811	0.00%	126.11	30.00	31.10	20.88
2010-2039	1114915	21.21%	152.86	36.36	37.70	25.31
2040-2069	1384186	50.49%	189.78	45.15	46.81	31.42
2070-2099	1283455	39.53%	175.97	41.86	43.40	29.13

Tabla 5.16 Incremento de la población y de las diferentes demandas para el acuífero Morelia-Queréndaro

5.7 Cambios en el embalse Cointzio.

5.7.1 Incremento en la evaporación.

El embalse o presa Cointzio se verá afectado cuantitativa como cualitativamente por el cambio climático, afectando la cantidad como la calidad del agua. En el presente trabajo se analizó la evaporación del embalse debido al incremento de temperatura para lo cual se correlaciona la temperatura y la evaporación en el embalse, se puede realizar una sola ecuación para obtener las evaporaciones con cambio climático, más sin embargo se recomienda realizar 1 correlación para cada mes, estableciendo 12 ecuaciones, esto se debe principalmente a que el volumen del embalse no es el mismo a lo largo del año y depende de este la superficie física que ocupa y por lo tanto la cantidad de agua expuesta a superficie libre. En la figura 5.76 se muestra la correlación anual del embalse.

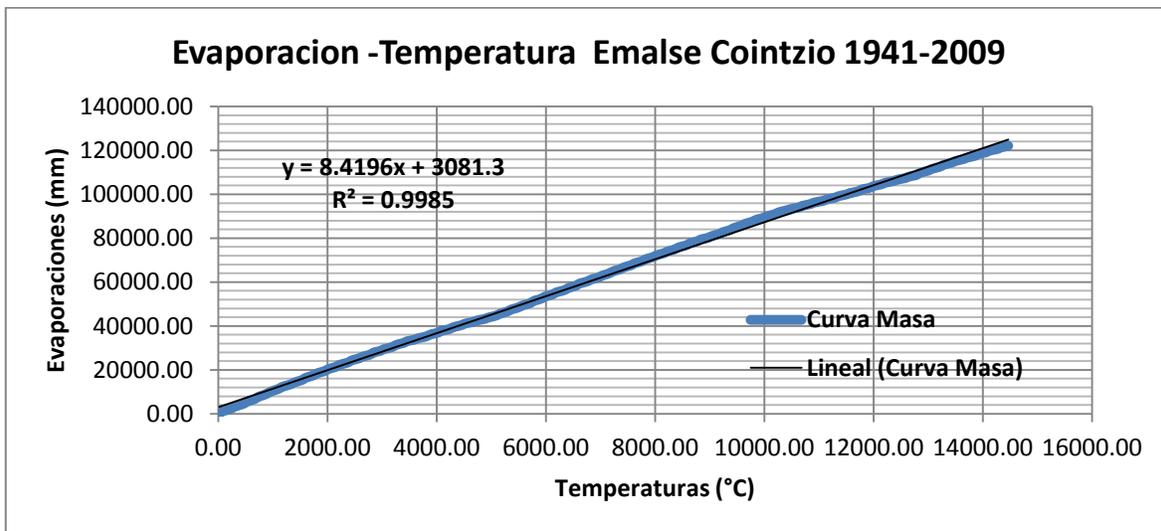


Figura 5.76 Correlación anual lineal del Embalse Cointzio para los años 1941-2009.

La evaporación en el embalse Cointzio aumenta siguiendo el mismo patrón de la evaporación de los años 1940-2009 y donde los incrementos son ligeramente mayores donde el embalse se



encuentra a mayor capacidad, pero principalmente en los meses más cálidos. El mes donde se presenta la mayor evaporación es abril con 233.13 mm y el mes donde se da la menor evaporación es diciembre con tan solo 102.06 mm; la evaporación anual del embalse es de 1770 mm/año.

La línea evolutiva A2 se encuentra representada en la figura 5.77 donde se pueden observar los incrementos mensuales son mayores y siguen el mismo patrón que para el periodo histórico, los mayores incrementos se dan en el mes de abril. En promedio anual los incrementos son del 4.89% para el escenario A2 2010-2039, para el escenario 2040-2069 el incremento es de 9.77% y para el escenario A2 2070-2099 aumenta en 14.66%, pasando de los 1700 mm/año a los 2029 mm/año.

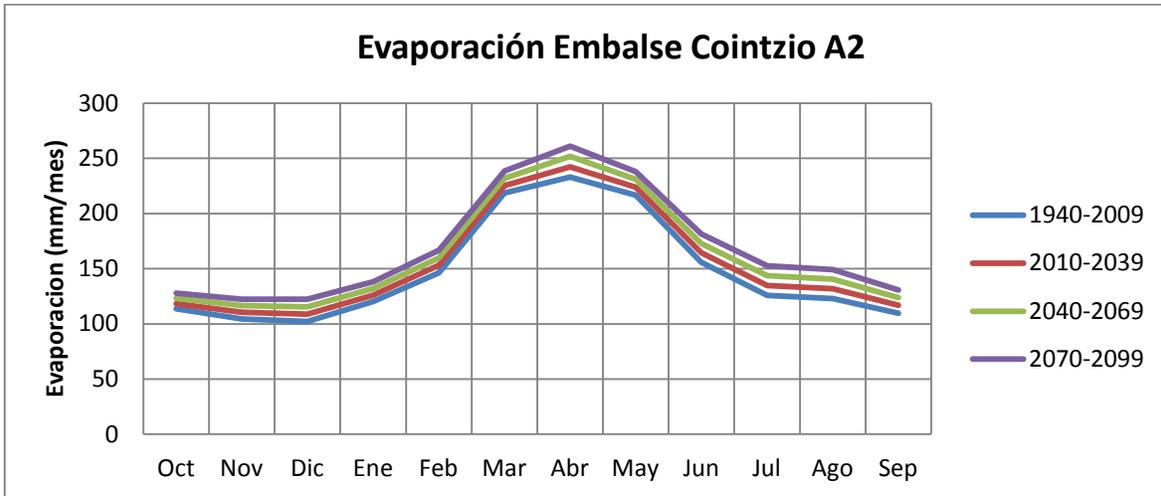


Figura 5.77 Evolución de la evaporación en el embalse Cointzio para la línea evolutiva A2

La línea evolutiva A1B (figura 5.78) presenta el mismo comportamiento que la línea evolutiva A2, presentando incrementos de la evaporación menores para los tres escenarios correspondientes a cada familia, los incrementos son del 4.36%, 8.34% y 12.51% para los escenarios A1B 2010-2039, A1B 2040-2069 y A1B 2070-2099 respectivamente y para este último escenario la evaporación en el embalse llega a los 1991 mm/año.

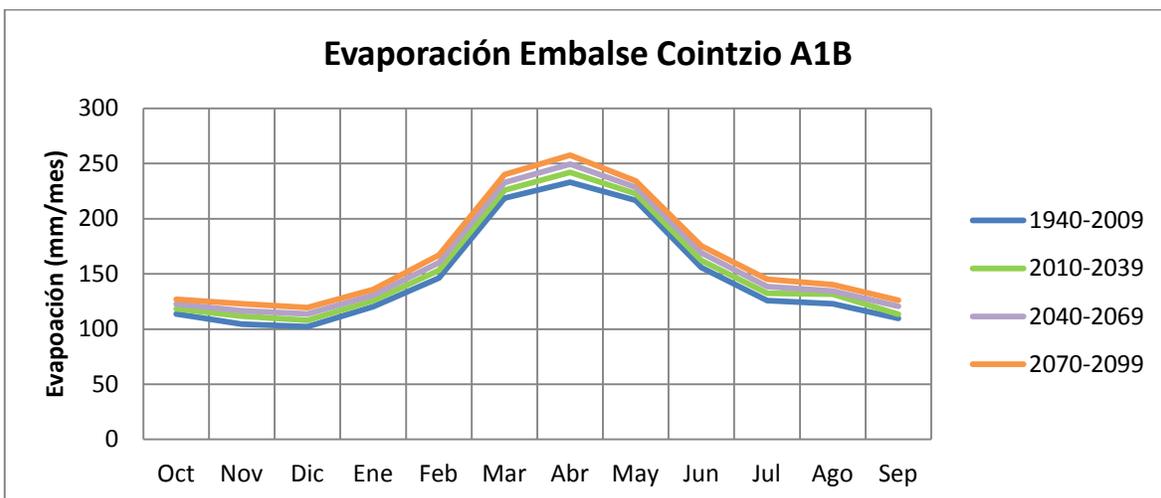


Figura 5.78 Evolución de la evaporación en el embalse Cointzio para la línea evolutiva A1B



La línea evolutiva B1 (figura 5.79) presenta los menores incrementos en la evaporación del embalse que las otras dos líneas evolutivas incrementándose apenas en 2.94% para el escenario 1 2010-2039, 5.51% para el escenario B1 2040-2069 y 8.26% para el escenario B1 2070-2099, con una evaporación anual de 1916 mm.

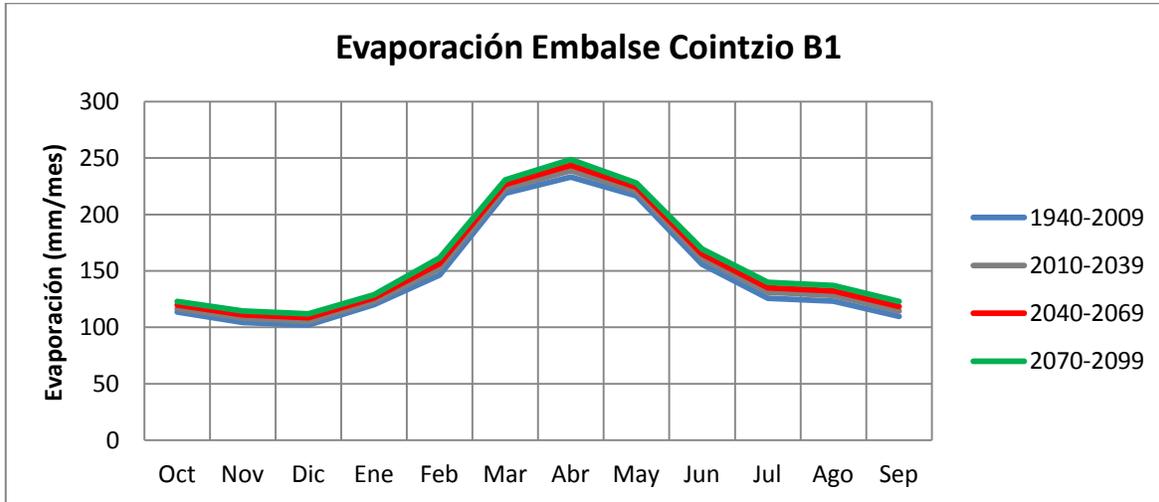


Figura 5.79 Evolución de la evaporación en el embalse Cointzio para la línea evolutiva B1

5.7.2 Disminución de la capacidad

La capacidad del embalse se ve disminuida debido al que la aportación Cointzio lleva consigo sedimentos, los cuales azolvan la presa desde su creación en 1939. La acumulación anual de azolves de la presa a la fecha tiene operando un período de 70 años con una pérdida en volumen al NAMO de: 17.75 hm³ y 0.25 hm³ pérdida promedio anual. El volumen almacenado al NAME es de 79.23 hm³ y una capacidad para control de avenidas de 10.71 hm³ (CONAGUA 2009c).

La presa Cointzio aún puede operar un mínimo de 73 años, más sin embargo se puede incrementar esta debido a que el volumen de azolve va reducir debido a la reducción de los gastos en la aportación Cointzio, como una consecuencia del cambio climático. En la actualidad se tiene un tirante libre de 3.31 m entre el umbral de la obra de toma y el piso actual en este sitio por lo tanto: si tenemos un tirante libre de 3.31 m ÷ 0.045 m de espesor acumulado anualmente, teóricamente la presa seguirá operando 73 futuros años. Esta cifra discrepa con la comparativa que se presenta en el cálculo de tabla y gráfica de elevaciones-áreas-capacidades en los que la capacidad para acumulación de azolve al umbral de la obra de toma (NAMINO), que indica es de 0.91 hm³ si anualmente se depositó un volumen de azolve de 0.254 hm³, el nivel de este alcanzará el umbral en: $0.91 \div 0.254 = 3.58$ años.

Estos valores no se verán afectados manera tan importante como en la actualidad, esto debido a la disminución de los escurrimientos y por lo tanto a la disminución de los sedimentos. Ahora bien para el presente trabajo suponiendo que la presa seguirá operando hasta el 2099, y correlacionando el escurrimiento con el volumen sedimentado anual podemos conocer los



volúmenes y capacidades para la presa Cointzio correspondiente a los diferentes escenarios propuestos.

Para los años 2010-2039 la línea evolutiva A2 (diciembre del 2039) como es el que presenta los mayores decrementos en los escurrimientos es el que menos pérdida de capacidad presenta en la presa, su capacidad al nivel de aguas máximo extraordinario (NAME) se reducirá en 5.339 hm³ respecto al año 2010 y con un volumen al NAME de 73.894 hm³. Para la línea evolutiva se A1B (diciembre del 2039) que es la que presenta los cambios más drásticos, es decir donde se pierde la mayor capacidad del embalse (6.606 hm³) reduciéndose hasta los 72.627 hm³. Para la línea evolutiva B1 se estima que la capacidad disminuirá 6.203 hm³ quedando con un volumen al NAME para diciembre el año 2039 de 73.030 hm³. En la figura 5.80 se muestra la evolución de la capacidad del embalse para las tres líneas evolutivas.

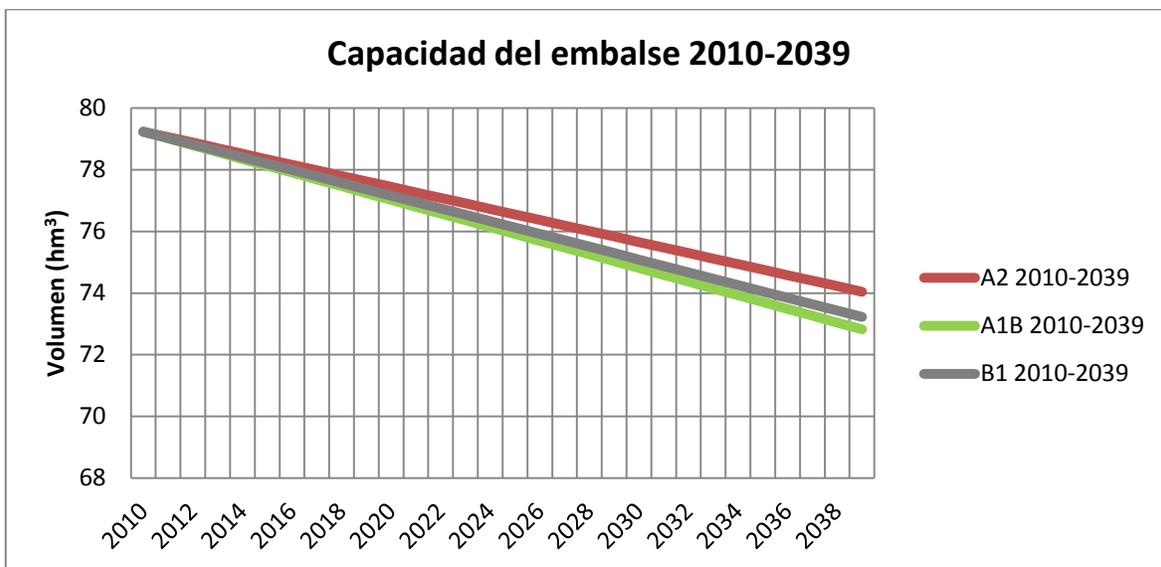


Figura 5.80 Disminución de la capacidad del embalse Cointzio para los años 2010-2039.

La capacidad del embalse para los años 2040-2069 presenta el mismo comportamiento que para los años 2010-2039 siendo menos afectada la línea evolutiva A2, seguida B1 y finalmente la A1B (figura 5.81). Para la línea evolutiva A2 se reduce la capacidad del embalse en 9.818 hm³ con respecto al 2010, donde el volumen al NAME para diciembre 2069 será de 69.414 hm³. La línea evolutiva A1B por su parte presenta decrementos en el volumen de 12.445 hm³ y con un volumen al final del mes de diciembre de 66.778 hm³. Para la línea evolutiva B1 se estima un azolve de 12 hm³ y donde se estima un volumen al final del mes de diciembre de 2069 de 67.227 hm³.

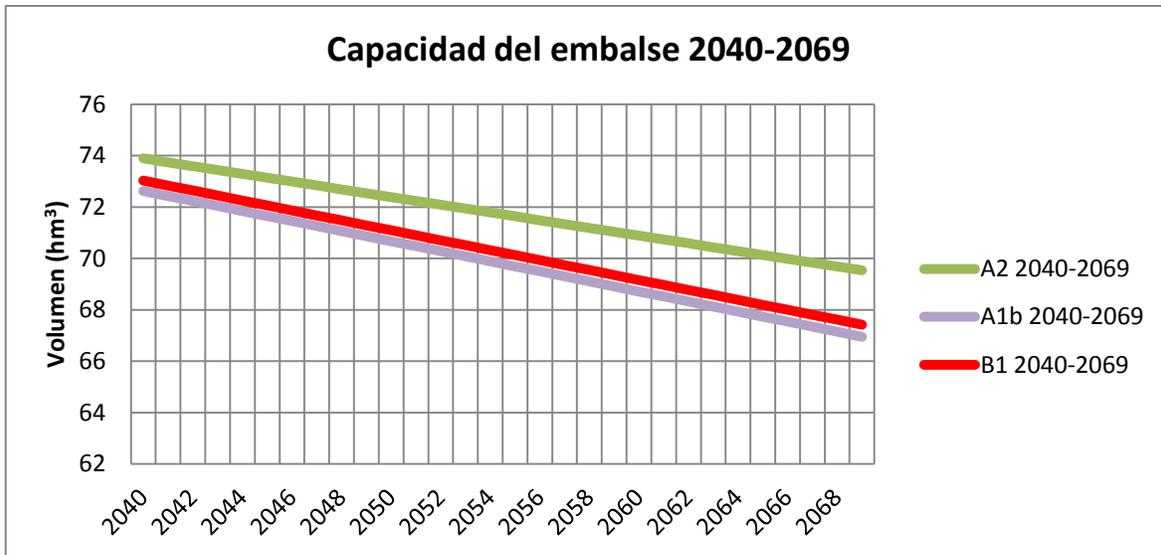


Figura 5.81 Disminución de la capacidad del embalse Cointzio para los años 2040-2069.

La capacidad del embalse para el último tercio del siglo (2070-2099) la línea evolutiva A2 (figura 5.82) presenta los mínimos azolves en la presa Cointzio con 13.289 hm³ con respecto al 2010 y donde la capacidad del embalse desciende a 65.944 hm³. La línea evolutiva B1 a tiene una mayor capacidad para los inicios del escenario más sin embargo para finales del año 2099 es el escenario que presenta los mayores azolves debido a la recuperación de los gastos para este escenario, el azolve es de 17.941 hm³ con respecto al 2010 presentando una capacidad del embalse de 61.292 hm³. El escenario A1B para inicios del escenario (2070) es el escenario más crítico, pero debido a que hay un decremento importante de los escurrimientos el azolve de la presa para finales del 2099 es de 17.54 hm³ por debajo de la línea evolutiva B1 y con una capacidad final del embalse de 61.693 hm³.

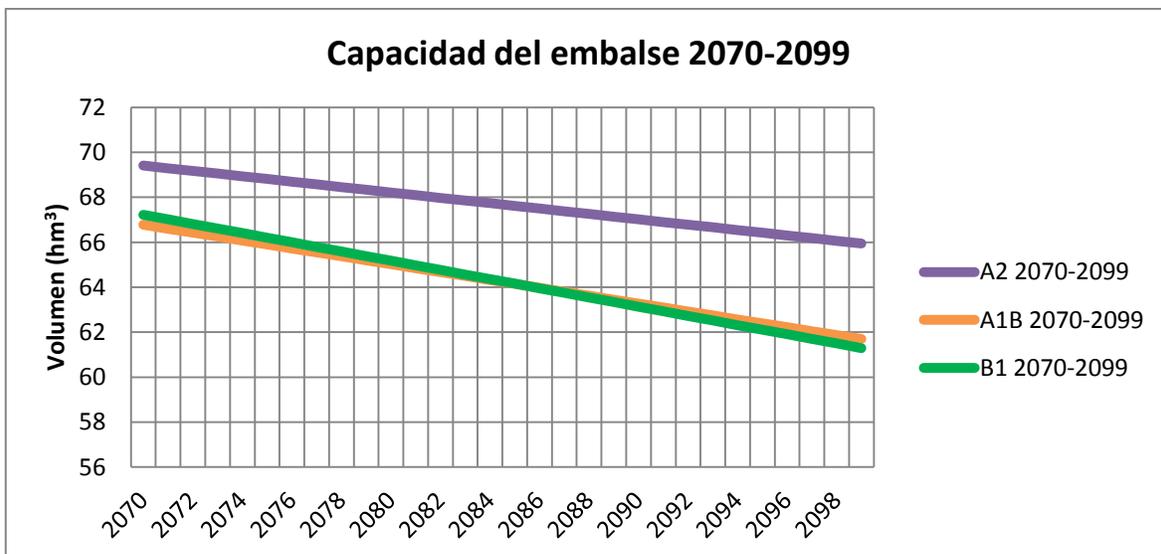


Figura 5.82 Disminución de la capacidad del embalse Cointzio para los años 2070-2099.



5.8.- Resultados de la simulación conjunta para los diferentes escenarios mediante AQUATOOL (SIMGES).

Los sistemas de apoyo a la decisión han surgido como herramienta de diseño para ayudar a contestar preguntas específicas facilitando el empleo de los modelos de simulación y optimización para la gestión de los recursos hídricos.

Aquatool (sistema de apoyo a la decisión para la gestión de cuencas complejas) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, nos permite crear los esquemas de simulación para la cuenca en estudio, así como visualizar las reglas de operación del mismo.

Aquatool cuenta con el módulo SIMGES (simulación de gestión) que es el que permite hacer la gestión del sistema así como evaluar múltiples elementos. El suministro de agua en la cuenca se evalúa con los índices de garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas, industriales, entre otras. Para esto se debe realizar el análisis cuantitativo en la cuenca del río Grande de Morelia, el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro y el acuífero Morelia-Queréndaro visto en los capítulos 5.1 al 5.7, se procede mediante el modelo de gestión de recursos hídricos, Aquatool, para reproducir la gestión del sistema y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas, establecidas en dicho sistema. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología, han permitido estimar los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos, estas estimaciones corresponden a los cambios en las demandas de riego, demandas urbanas e industriales, evapotranspiraciones, en las aportaciones, en los niveles y recargas de los acuíferos, tanto anuales como mensuales, en los niveles medios de los embalses y en la evaluación de las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas una vez realizadas las simulaciones con el modelo de gestión.

Para calcular las necesidades hídricas en cantidad, espacio y tiempo implica disponer de un sistema de recursos hidráulicos, que permita hacer una distribución de las aportaciones a la estructura de la demanda. Estas aportaciones están condicionadas por el ciclo hidrológico que condiciona la estructura del sistema que a su vez viene fijada por los diversos usos y aplicaciones del agua.

5.8.1 Modelo de simulación y calibración.

Enseguida se analiza la gestión del sistema de explotación de la cuenca del río Grande de Morelia bajo los diferentes escenarios climáticos (figura 5.38), la simulación de la gestión del sistema se ha realizado con el SIMGES del Sistema Soporte a la Decisión Aquatool (Andreu et al. 1996).



“Aportación Cointzio”. La demanda urbana es abastecida superficialmente por el embalse Cointzio y por el acuífero Morelia-Queréndaro mediante en manantial Mintzita.

El acuífero de autovalores Morelia-Queréndaro es una parte fundamental de la modelación, interactúa de manera directa con el sistema superficial y el cual recibe recargas de los retornos urbanos y de riego, las recargas verticales por lluvia y las recargas horizontales de las partes altas del acuífero, además se consideran salidas de los bombeos del acuífero, salidas naturales al lago de Cuitzeo, por manantiales y por evapotranspiraciones. Para unir el sistema subterráneo con el sistema superficial es necesario considerar tomas ficticias al sistema superficial o bombeos adicionales.

El tramo de río denominado “Grande 1”, es una conducción a régimen natural, representado en el esquema por una conducción tipo 1 que parte desde el nudo 1 (Embalse Cointzio), hasta el nudo 2 (Derivadora La Huerta).

El nudo 2 representa en nuestro esquema a la “Derivadora la Huerta” Por medio de esta derivadora se suministra el agua de riego para una parte de la demanda agrícola del Módulo 1, del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Toma “Canal la Huerta” esta toma sale de la Derivadora la Huerta, y distribuye el agua de riego a una parte de la demanda del Módulo 1, por la margen derecha del río grande de Morelia.

El tramo de río denominado “Grande 2” es la continuación del río Grande de Morelia desde el nudo 2 (Derivadora la Huerta), hasta el nudo 3 (Derivadora Cointzio) donde se extrae agua para abastecer la demanda del Módulo 1.

El tramo de río “Grande 3” se considera a partir de la derivación al canal Cointzio y hasta el retorno industrial (CEPAMISA).

En el nudo 4 se consideraron tomas ficticias como la salida por manantiales y por pozos profundos de la ciudad de Morelia que son extraídas del acuífero Morelia-Queréndaro, además se agrega el retorno de la demanda CEPAMISA que es abastecida por el manantial la Mintzita.

El tramo de río “Grande 4” corresponde al río Grande de Morelia desde el nudo 4 (descarga de agua industrial), hasta el nudo 5, punto donde se encuentra ubicada la aportación del río Chiquito.

El nudo 5 corresponde a la “aportación del río Chiquito” que se ubica en la zona urbana de Morelia, los retornos urbanos y de riego del Módulo 1, además de la toma ficticia de las demandas de otras poblaciones del acuífero.

El tramo de río “Grande 5” es la continuación del cauce natural río Grande de Morelia desde el punto de confluencia con el río Chiquito (nudo 5), hasta la derivadora Atapaneo (nudo 6).

El nudo 6 representa la “Derivadora Atapaneo (la Goleta)” de la cual se deriva agua para una parte de la demanda agrícola del Módulo 2 a través del canal la Goleta. En este mismo nudo se ubica la aportación “Atapaneo” ya que es la aportación hecha por la intercuenca desde el embalse Cointzio



hasta la Derivadora Atapaneo. También se considera una toma ficticia de las salidas naturales por evapotranspiración del acuífero Morelia-Queréndaro

El tramo de río denominado “Grande 6”, es la continuación del río Grande de Morelia desde la derivadora Atapaneo (nudo 6), hasta la derivadora Corrales y Nopalera (nudo 7).

El nudo 7 representa a las “Derivadoras Corrales y Nopalera”, por medio de las cuales se deriva agua para uso agrícola del Módulo 2, el canal Corrales sale por la margen de izquierda del río Grande y el canal Nopalera por la margen derecha.

El tramo de río “Grande 7”, es la continuación del río Grande de Morelia desde las derivadoras Corrales y Nopalera hasta la Derivadora Quirio.

El nudo 8 corresponde a la “Derivadora Quirio” por medio de la cual se deriva agua a la demanda agrícola del Módulo3, a través del canal Joconoles. El acuífero Morelia-Queréndaro también proporciona un volumen para satisfacer la demanda agrícola del Módulo 3 por medio de bombeos presentes en el Módulo. También se considera una salida natural del acuífero Morelia-Queréndaro debido a su conexión con el lago de Cuitzeo.

El tramo de río “Grande 8” es la continuación del río Grande desde la derivadora Quirio (nudo 8) hasta la derivadora Zacapendo (nudo 9).

En el nudo 9 se ubica la “Derivadora Zacapendo” por medio de la cual se suministra agua para la demanda agrícola del Módulo 4, y de igual manera que el Módulo 3 una parte de la demanda es abastecida de las aguas subterráneas del acuífero Morelia-Queréndaro.

El tramo de río “Grande 9” es la continuación del río Grande de Morelia desde la Derivadora Zacapendo hasta el punto donde desemboca al lago de Cuitzeo.

El nudo final es la desembocadura del Río Grande de Morelia en el “lago de Cuitzeo”.

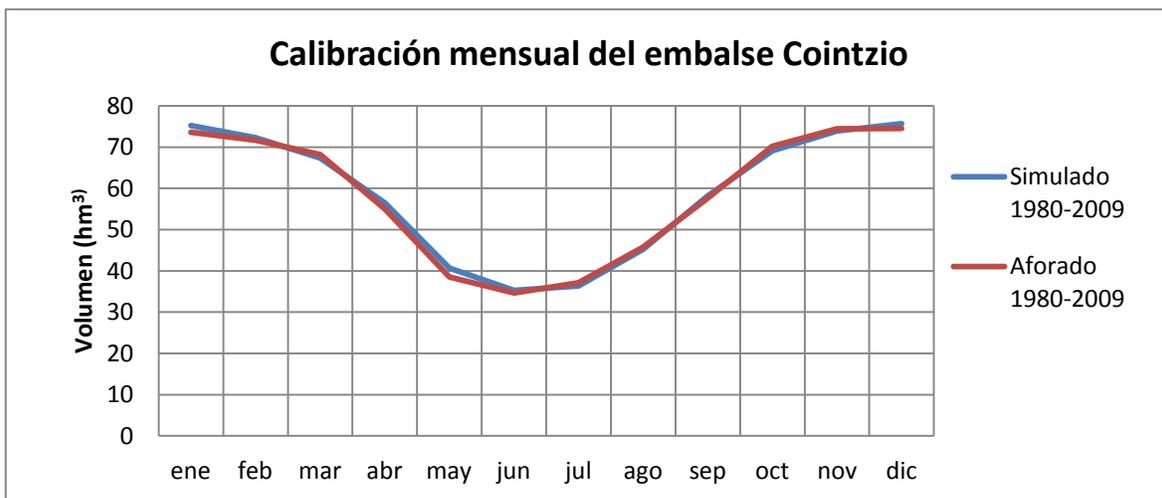


Figura 5.84 Volúmenes mensuales aforados y simulados para los años 1980-2009 para el embalse Cointzio.



Una vez realizado el esquema con todas sus componentes se realiza una simulación y se calibra el esquema, es decir lo simulado debe ser lo mayor posible a la realidad, para nuestro caso calibramos en el embalse Cointzio donde verificamos que los volúmenes mensuales sean similares a los volúmenes históricos. En la figura 5.84 se puede observar el embalse calibrado, donde el coeficiente de correlación es de 0.99 entre los volúmenes aforados y los simulados. En promedio anual el volumen aforado es de 58.44 hm³ y el volumen simulado es de 54.80 hm³, solamente teniendo un error anual de 0.37 hm³.

La evolución de la calibración en el embalse se observa en la figura 5.85 donde se puede observar que siguen la misma tendencia los volúmenes simulados y los volúmenes aforados. Se presentan algunas diferencias entre ambos volúmenes, más sin embargo en general el comportamiento de los volúmenes es aceptable.

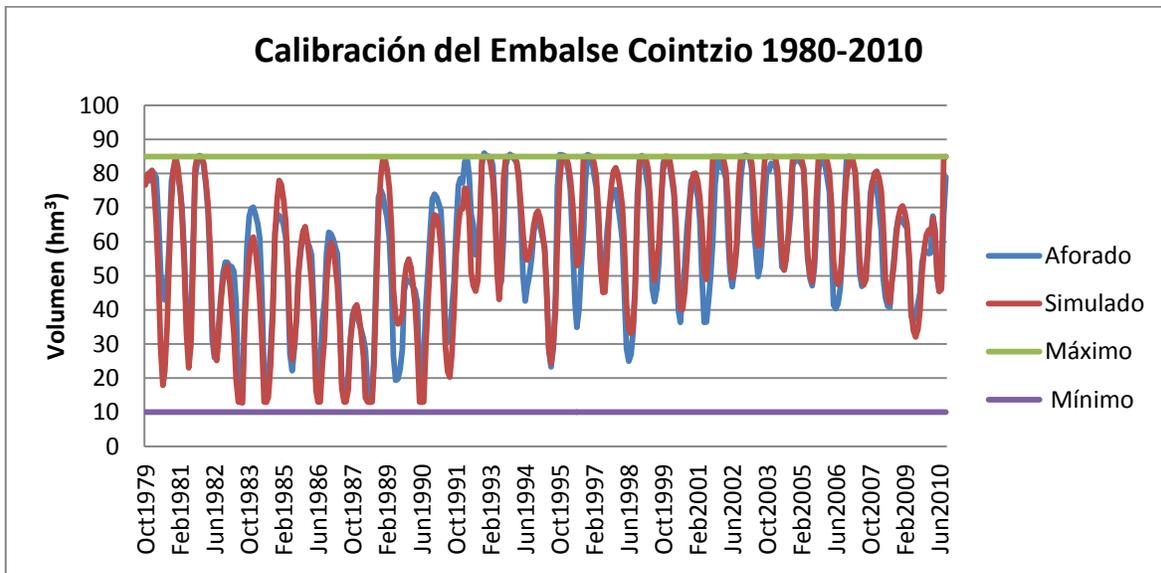


Figura 5.85 Evolución de los volúmenes aforados y simulados para los años 1980-2009 para el embalse Cointzio.

5.8.2 Resultados para los escenarios de cambio climático.

Una vez calibrado el sistema superficial y el sistema subterráneo se procede a hacer las simulaciones para los diferentes escenarios de cambio climático, donde el embalse Cointzio se verá afectado principalmente por la disminución en la aportación Cointzio.

La evolución del volumen medio mensual del embalse Cointzio para la línea evolutiva A2 se presenta en la figura 5.86 donde se puede observar un descenso muy significativo en el volumen del embalse, principalmente en los meses de abril – agosto, meses donde el déficit para el suministro de la demanda se puede incrementar de manera más importante. El escenario A2 2010-2039 tiene en promedio anual descensos de 22.69 hm³ con respecto al escenario base, el promedio anual el embalse Cointzio tendrá un volumen medio de 36.11 hm³. El escenario A2 2040-2069 estima volúmenes entre los 10 hm³ (NAMIN) y los 40 hm³, con un promedio anual de



27.11 hm³. El escenario A2 2070-2099 estima los escenarios más críticos con un volumen promedio anual de 20.96 hm³ y donde se dejarían de embalsar 37.84 hm³ con respecto a la condición actual.

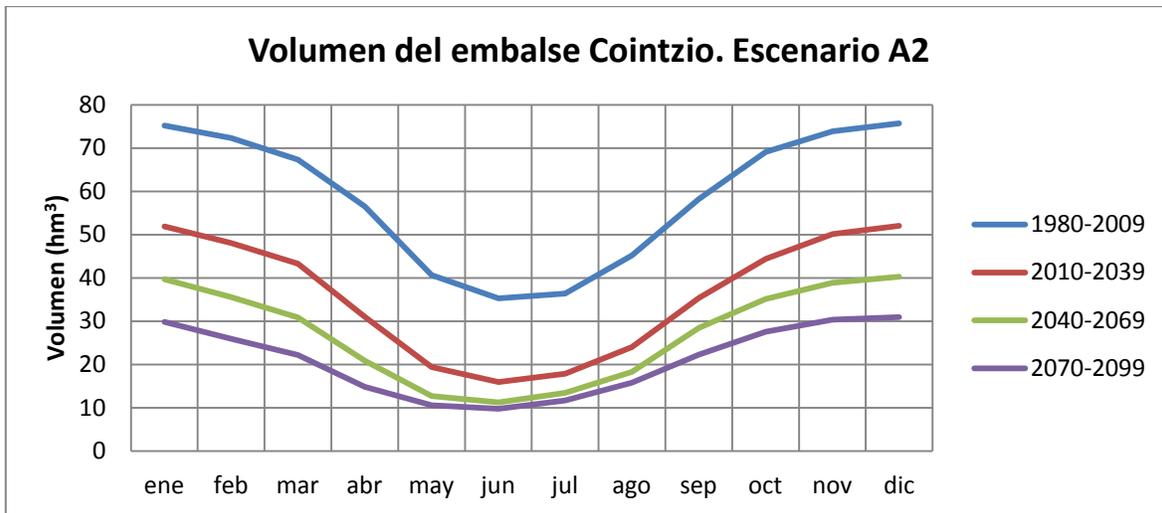


Figura 5.86 Volumen medio del embalse Cointzio para la línea evolutiva A2.

La línea evolutiva A1B presenta decrementos menos importantes que la línea evolutiva A2, más sin embargo la disponibilidad del recurso hídrico evidentemente se ve afectada de manera importante. El escenario A1B 2010-2039 estima un volumen medio anual de 48.08 hm³ y en donde se dejarían de embalsar más de 10 hm³. Con respecto a los escenarios A1B 2040-2069 y A1B 2070-2099 se tienen decrementos similares en el volumen embalsado con más de 22 hm³, esto se debe principalmente a que la disminución en la aportación Cointzio es muy similar para estos dos escenarios. En la figura 5.87 se muestra la evolución de los volúmenes medios mensuales del embalse donde se observa que los meses más críticos seguirán siendo abril-agosto.

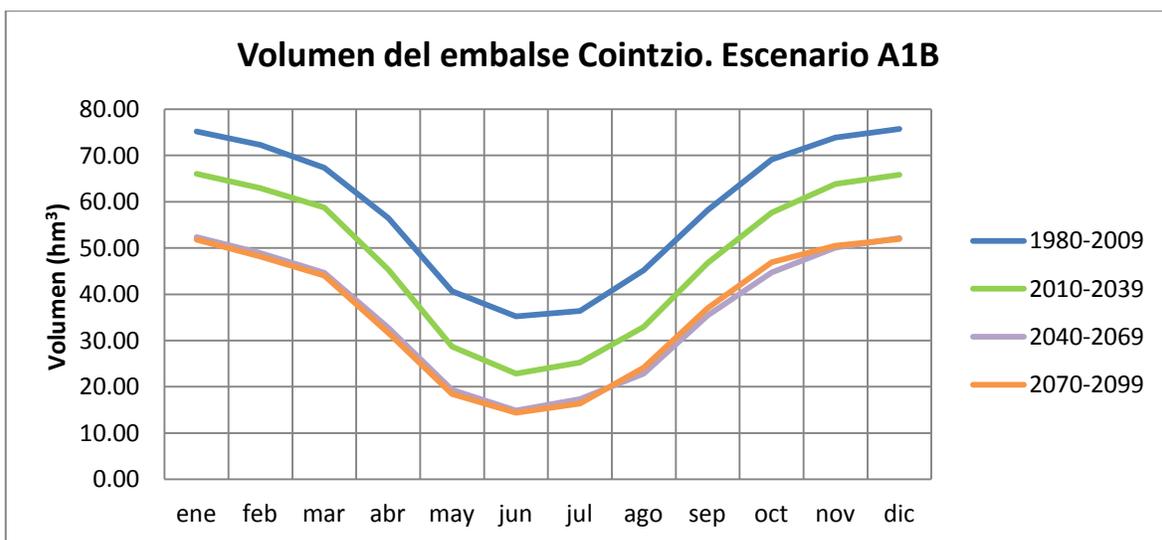


Figura 5.87 Volumen medio del embalse Cointzio para la línea evolutiva A1B.



La línea evolutiva B1 es similar a la línea evolutiva A1B siendo esta mayor para el escenario B1 2010-2039 y menor en los escenarios B1 2040-2069 y B1 2070-2099, siendo el volumen medio anual de 45.81 hm³, 36.93 hm³ y 36.98 hm³ respectivamente (figura 5.88). Para el último tercio de siglo el volumen del embalse es ligeramente mayor al segundo tercio, esto se debe principalmente a que los efectos del cambio climático disminuyen su intensidad tanto para la temperatura como para la precipitación.

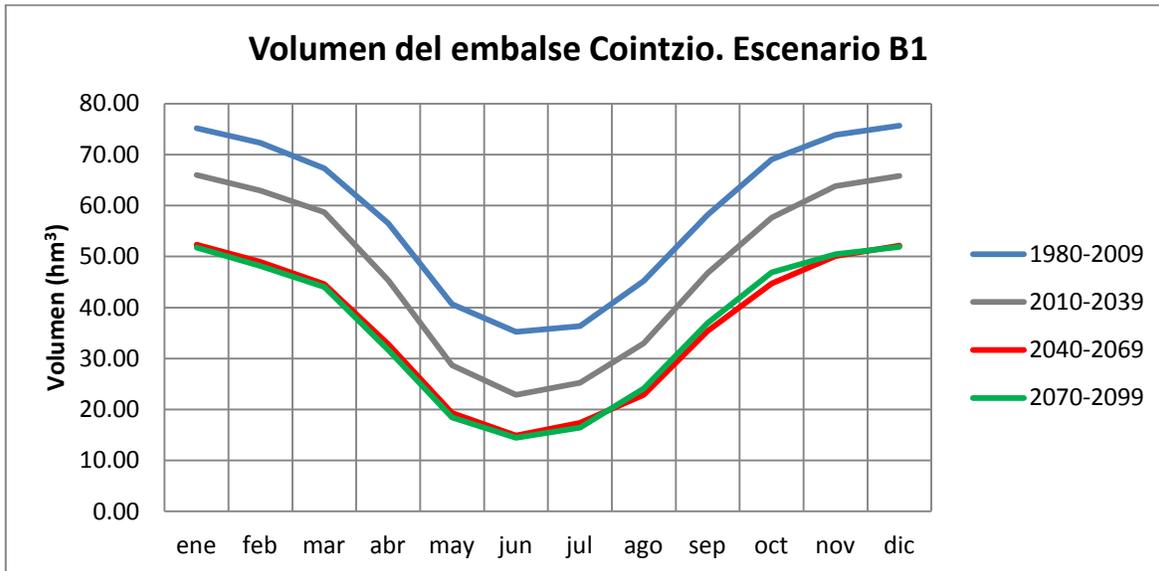


Figura 5.88 Volumen medio del embalse Cointzio para la línea evolutiva B1.

5.8.3 Análisis de resultados de garantías mediante diferentes criterios de Evaluación para las demandas agrícolas

Criterio UTAH-DWR: Este criterio es utilizado para el análisis de las garantías a las demandas agrícolas en la IPH2008. Este criterio es el más exigente respecto al déficit que se puede presentar en una demanda agrícola, esto se debe principalmente a que se trata de evitar el estrés hídrico y la disminución del rendimiento por hectárea. Este criterio se cumple si las tres condiciones siguientes cumplen:

-  El déficit en un año no puede exceder el 50% de la demanda actual.
-  El déficit de dos años consecutivos no puede exceder el 75% de la demanda anual.
-  El déficit de 10 años consecutivos no puede exceder el 100% de la demanda anual.

Criterio de Garantías Volumétricas: Este criterio nos representa el porcentaje del volumen que se está entregando respecto al demandado considerando crítico menor del 70%.

Criterio de Garantía Mensual: Este criterio nos representa la garantía mes con mes donde se entrega la totalidad del agua demandada. No menor de 70%.

Criterio de Garantía Anual: Este criterio nos representa el % garantía año con año donde se entrega la totalidad del agua demandada. No menor de 70%.



Para realizar el análisis de las diferentes garantías citadas anteriormente se realizará uno por cada una de las demandas que son parte del sistema del río grande de Morelia.

La demanda agrícola para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro evoluciona al pasar de los años debido al cambio climático y por lo tanto el déficit presentará incrementos a lo largo del tiempo.

El Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro presenta incrementos en los déficits tal como muestra la figura 5.89, donde los meses marzo-mayo son los que presentan mayor conflicto por el suministro a la demanda. El escenario más optimista es el A1B 2010-2039 donde el déficit es de 0.185 hm³ y el escenario más crítico es el A2 2070-2099 donde el déficit es de 2.626 hm³ en promedio anual.

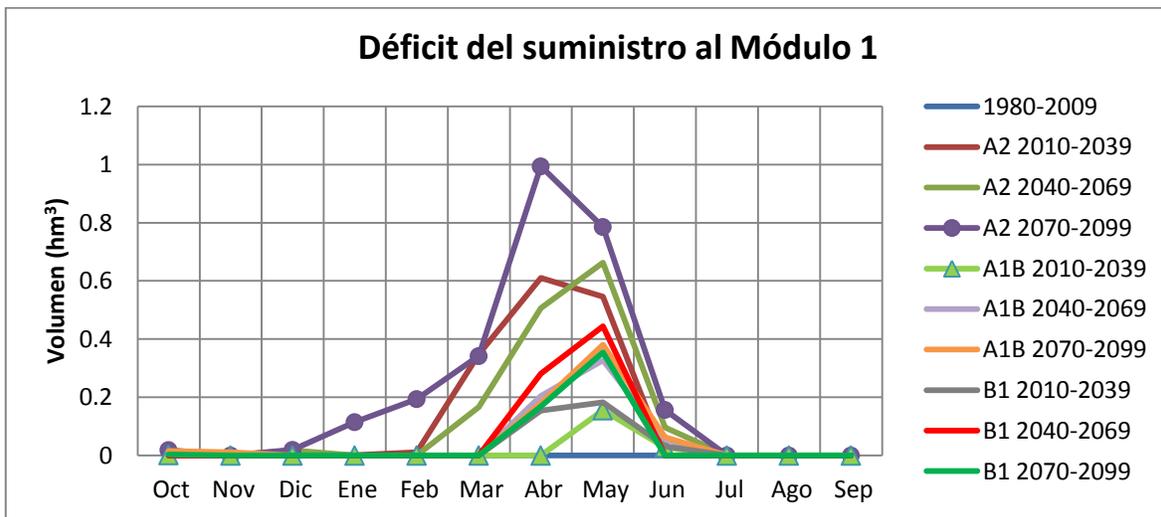


Figura 5.89 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

El resumen de los criterios para el análisis de las garantías y déficits se encuentra en la tabla 5.20 donde se marca con rojo los fallos al criterio establecido.

La garantía mensual se cumple para todos los escenarios excepto para el escenario A2 2070-2099 (rojo), más sin embargo para la garantía anual solamente cumplen los escenarios A1B 2010-2039 y B1 2010-2039 (tabla 5.20), es decir mensualmente donde no se entrega la totalidad de la demanda es un fallo y desciende la garantía, y anualmente si hay un fallo en un mes, la garantía desciende por tal motivo las garantías anuales presentan menores porcentajes. En volumen según el criterio establecido se considera en crisis el escenario A2 2070-2099, es decir en volumen demandado es mucho mayor que el volumen suministrado por lo tanto los cultivos presentarán estrés hídrico y su rendimiento disminuirá.

En el criterio UTAH-DWG se cumple solamente que los tres criterios cumplan y cómo podemos ver en la tabla 5.20 solamente el escenario A1B 2010-2039 cumple el criterio, por lo tanto hay la posibilidad de que los cultivos presenten estrés hídrico.



Escenario	Garantía			Criterio UTAH-DWG		
	Mensual	Anual	Volumétrica	1 año	2 años	10 años
1080-2009	98.89%	93.33%	98.83%	16.94%	16.98%	34.21%
A2 2010-2039	83.33%	40.00%	78.77%	56.91%	99.91%	306.29%
A2 2040-2069	74.44%	10.00%	71.25%	85.15%	132.28%	391.53%
A2 2070-2099	56.39%	6.67%	54.00%	94.93%	156.69%	560.40%
A1B 2010-2039	96.94%	73.33%	95.49%	39.30%	39.34%	90.75%
A1B 2040-2069	84.72%	53.33%	88.26%	52.47%	86.59%	143.97%
A1B 2070-2099	76.11%	53.33%	87.74%	64.24%	64.73%	183.70%
B1 2010-2039	94.72%	70.00%	91.91%	53.22%	61.86%	166.74%
B1 2040-2069	90.56%	36.67%	83.84%	56.81%	82.21%	270.60%
B1 2070-2099	84.72%	53.33%	88.33%	53.04%	57.96%	164.74%

Tabla 5.20 Criterios para el análisis del déficit en la demanda para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

El déficit en el Módulo 2 presenta los mayores déficits en los meses marzo-mayo, siendo más crítico para el escenario A2 2070-2099 donde el déficit en volumen alcanza 1.637 hm³/año y en el escenario menos crítico que es el B1 2010-2039 el déficit es de 0.315 hm³/año (figura 5.90).

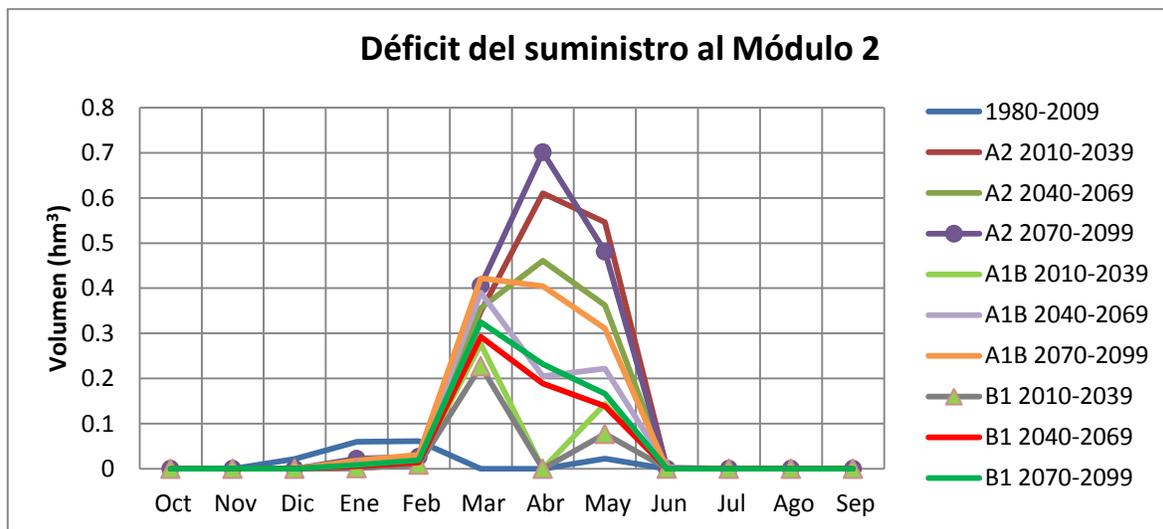


Figura 5.90 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 2 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Las garantías para el criterio mensual se cumplen solamente para dos escenarios, el A2 2010-2039 y el B1 2010-2039, los demás escenarios presentan una variación del 50% al 58%, por lo tanto los meses que no se entrega la totalidad del agua son un poco más de la mitad, cifra que para el criterio anual se reduce a 0%, es decir en todos los años por lo menos en un mes, no se entregó la totalidad del agua demandada. Mediante el criterio volumétrico solamente se considera en crisis



el escenario A2 2070-2099, más sin embargo algunos otros escenarios están cerca del límite, por lo tanto se debe tener cuidado en estos escenarios (A2 2040-2069, A1B 2070-2099).

El criterio UTAH-DWG cumple para 8 de los 9 escenarios propuestos para el año 1, para el año 2 cumplen 7 de los escenarios, más sin embargo para el análisis de los 10 años no cumple ningún escenario propuesto, por lo tanto ningún escenario cumple este criterio, excepto el escenario base.

El resumen de los criterios para el análisis de garantías y déficits se encuentra en la tabla 5.21 donde se marca con rojo los fallos al criterio establecido.

Escenario	Garantía			Criterio UTAH-DWG		
	Mensual	Anual	Volumétrica	1 año	2 años	10 años
1080-2009	74.17%	0.00%	95.30%	12.75%	18.41%	59.65%
A2 2010-2039	70.00%	0.00%	75.46%	77.17%	150.08%	546.82%
A2 2040-2069	58.33%	0.00%	72.41%	38.57%	69.43%	301.83%
A2 2070-2099	50.00%	0.00%	65.30%	44.72%	81.06%	371.15%
A1B 2010-2039	65.00%	0.00%	88.21%	18.12%	28.57%	129.43%
A1B 2040-2069	50.00%	0.00%	80.94%	36.17%	62.20%	205.93%
A1B 2070-2099	50.00%	0.00%	75.18%	40.34%	64.37%	275.91%
B1 2010-2039	73.06%	0.00%	90.11%	31.05%	44.89%	121.51%
B1 2040-2069	58.06%	0.00%	84.89%	31.57%	61.84%	165.24%
B1 2070-2099	58.06%	0.00%	82.88%	33.50%	50.60%	194.09%

Tabla 5.21 Criterios para el análisis del déficit en la demanda para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 2 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

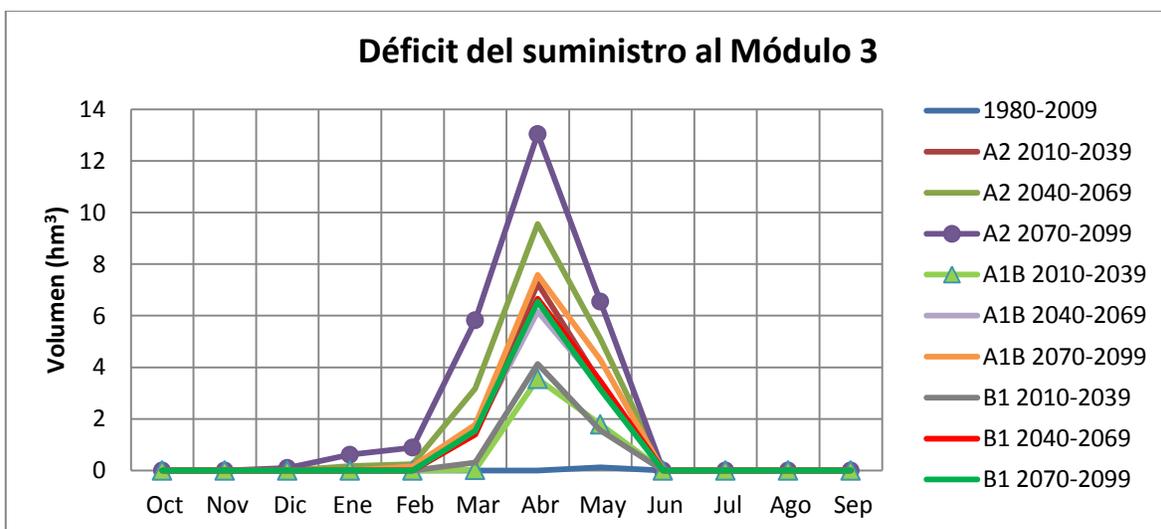


Figura 5.91 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.



El Módulo 3 presenta incrementos muy significativos al sistema, ya que es el de mayor extensión y mayor demanda; para el escenario A2 2070-2099 que es el más crítico se presenta un déficit en promedio anual de 27 hm³, lo que implica reducir el área de cultivo o cultivar los que requieren menor cantidad de agua. El escenario B1 2010-2039 presenta los escenarios más optimistas donde se tiene un déficit en volumen de 5.37 hm³. Los meses donde se presenta el mayor déficit son marzo-mayo tal como se muestra en la figura 5.91.

El criterio de la garantía mensual cumple en 8 de los 9 escenarios analizados, por su parte la garantía anual no cumple en ninguno de los escenarios, es decir tenemos fallos mensuales no tan significativos, pero recurrentes y por tal motivo la garantía anual disminuye drásticamente. La garantía volumétrica por su parte al igual que para los Módulos 1 y 2 cumple para todos excepto para el escenario A2 2070-2099 que es el más crítico de los escenarios analizados.

El criterio UTAH-DWG para el año 1 los escenarios que cumplen son 3 de los 9, los tres en los años 2010-2039, para el año 2 los escenarios que cumplen son 3 nuevamente, más sin embargo para el año 10 los déficits son muy grandes y por lo tanto el criterio no cumple en ninguno de los escenarios (tabla 5.22).

Escenario	Garantía			Criterio UTAH-DWG		
	Mensual	Anual	Volumétrica	1 año	2 años	10 años
1080-2009	99.17%	93.33%	99.72%	3.87%	4.61%	8.48%
A2 2010-2039	80.83%	36.67%	79.33%	45.62%	88.57%	310.53%
A2 2040-2069	73.33%	0.00%	71.37%	60.29%	109.65%	348.02%
A2 2070-2099	61.94%	0.00%	61.00%	62.65%	116.07%	442.61%
A1B 2010-2039	83.33%	0.00%	91.13%	29.49%	37.23%	126.12%
A1B 2040-2069	74.72%	0.00%	82.86%	53.54%	77.69%	211.96%
A1B 2070-2099	74.72%	0.00%	79.79%	59.91%	78.69%	260.21%
B1 2010-2039	82.22%	63.33%	89.74%	41.68%	57.24%	172.28%
B1 2040-2069	75.00%	0.00%	81.33%	53.14%	82.08%	287.55%
B1 2070-2099	74.72%	0.00%	82.39%	57.87%	73.28%	233.14%

Tabla 5.22 Criterios para el análisis del déficit en la demanda para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 3 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

El Módulo 4 es el segundo más grande del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, por lo tanto sus déficits al igual que en el Módulo 3 son importantes y como en los otros 3 Módulos los meses más críticos son marzo-mayo (figura 5.92), esto implica que el todo el sistema se verá en crisis en estos meses, que concuerda con los meses más cálidos, donde la precipitación es muy poca y donde los requerimientos de los cultivos son mayores. El déficit para este Módulo para el escenario A2 2070-2099 es de 14 hm³ y para el escenario A1B 2010-2039 es tan solo de 3 hm³

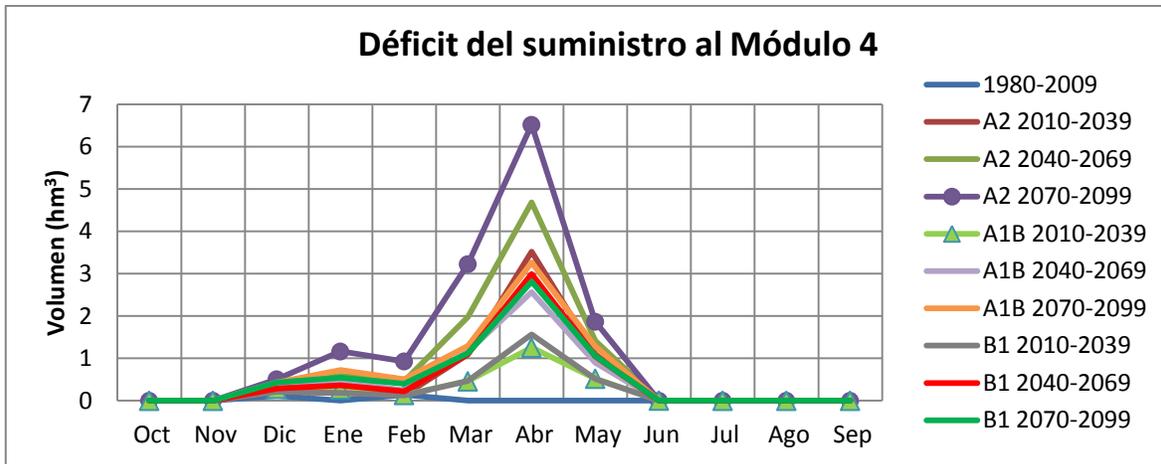


Figura 5.92 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Las garantías mensuales y anuales para el Módulo 4 son las más críticas de todo el sistema, ya que mensualmente y anualmente no cumplen ninguno de los escenarios. Para la garantía volumétrica no cumplen dos escenarios, donde nuevamente el escenario A2 2070-2099 presenta la menor garantía y por lo tanto el escenario más crítico.

El criterio UTAH-DWG al igual que para los otros escenarios no se cumple en ninguno de los casos, a pesar de que algunos escenarios cumplan para 1 o 2 años, para 10 años ninguno de los escenarios propuestos cumplen.

El resumen de los criterios para el análisis de las garantías y déficits se encuentra en la tabla 5.23 donde se marca con rojo los fallos al criterio establecido.

Escenario	Garantía			Criterio UTAH-DWG		
	Mensual	Anual	Volumétrica	1 año	2 años	10 años
1080-2009	82.50%	90.00%	98.41%	4.91%	8.00%	21.95%
A2 2010-2039	49.72%	40.00%	80.60%	48.73%	93.63%	306.33%
A2 2040-2069	49.72%	0.00%	65.89%	73.71%	134.10%	419.26%
A2 2070-2099	41.67%	0.00%	52.53%	76.77%	141.42%	540.29%
A1B 2010-2039	49.72%	0.00%	88.85%	34.00%	42.97%	150.55%
A1B 2040-2069	49.72%	0.00%	79.20%	65.33%	90.62%	252.58%
A1B 2070-2099	41.67%	0.00%	74.19%	72.46%	93.96%	316.90%
B1 2010-2039	50.00%	63.33%	88.00%	49.98%	63.33%	195.39%
B1 2040-2069	49.72%	0.00%	77.53%	63.20%	96.61%	332.33%
B1 2070-2099	49.72%	0.00%	77.28%	69.72%	87.60%	286.26%

Tabla 5.23 Criterios para el análisis del déficit en la demanda del Módulo 4 para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados al Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.



5.8.4 Análisis de resultados para la demanda urbana por medio del criterio IPH 2008

La demanda urbana por su parte presenta incrementos importantes en el déficit y debido a que se tienen la mayor prioridad en esta demanda, si no optimizamos, rehusamos, y reducimos el consumo del agua, los otros usos del agua pueden verse muy reducidos o incluso que no sea factible satisfacer estas necesidades.

El criterio fijado para demandas urbanas en la IPH2008 cumple si el déficit no supera en un mes el 8% de la demanda ni en 10 años el 10% de la demanda anual. En garantía volumétrica el volumen que se considera crítico para el análisis de la demanda urbana es del 90%.

Para las condiciones actuales el déficit en un año es del 7% y del 12.66% para la demanda anual y del 90.83% en garantía volumétrica, por lo tanto en la actualidad estamos en el límite para el déficit en un año y para el criterio volumétrico y el déficit en 10 años no se cumple, ya que es mayor del 10%.

Obviamente para los escenarios climáticos no se cumple ninguna de estas garantías donde el escenario A2 2070-2099 es el más crítico y escenario A1B 2010-2039 es el más optimista. Para la garantía volumétrica el rango es de 34.82% a 80.49%, el déficit en un año se encuentra en el rango de 24.77% a 69.84% y el déficit en 10 años se encuentra en un rango de 203% a 661% para estos dos escenarios respectivamente.

En la figura 5.93 podemos ver la evolución mensual del déficit a la demanda urbana para los diferentes escenarios donde en volumen el déficit es de de 1 hm³ a 6 hm³ en promedio mensual.

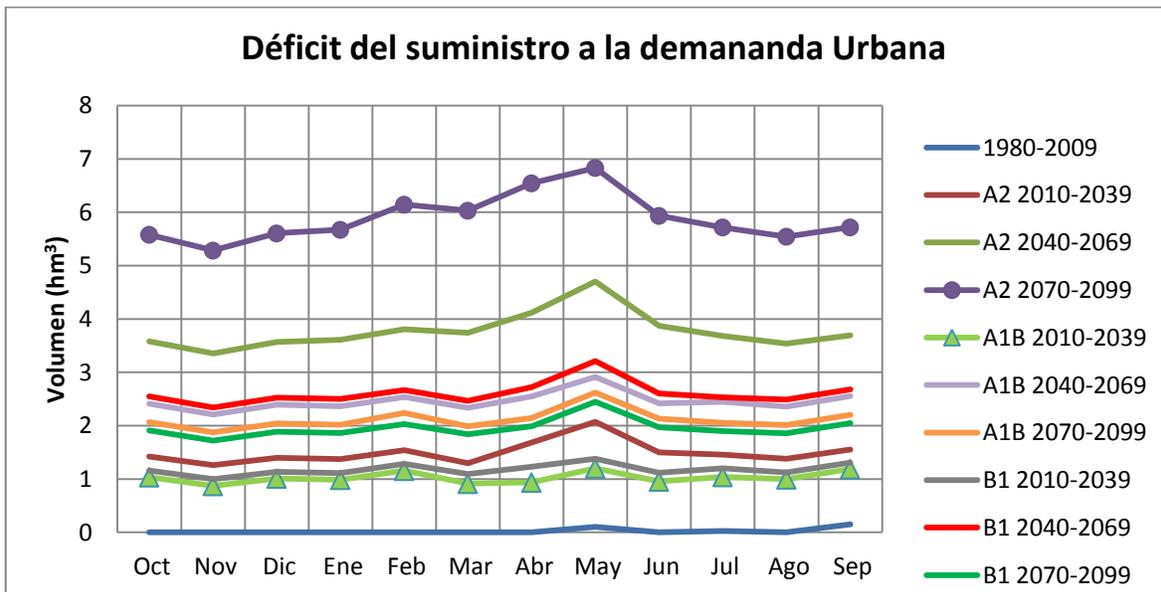


Figura 5.93 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados a la demanda urbana de Morelia.



5.8.5 Análisis de resultados para la demanda industrial

Para analizar la demanda industrial, es necesario realizar un estudio más detallado de la industria, y ver cuál es el déficit máximo que se puede permitir. El déficit máximo que se presenta para esta industria es de 0.39 hm³/mes para el escenario A2 2070-2099. En la figura 5.94 se muestra el déficit que es constante para los diferentes escenarios propuestos en el presente estudio.

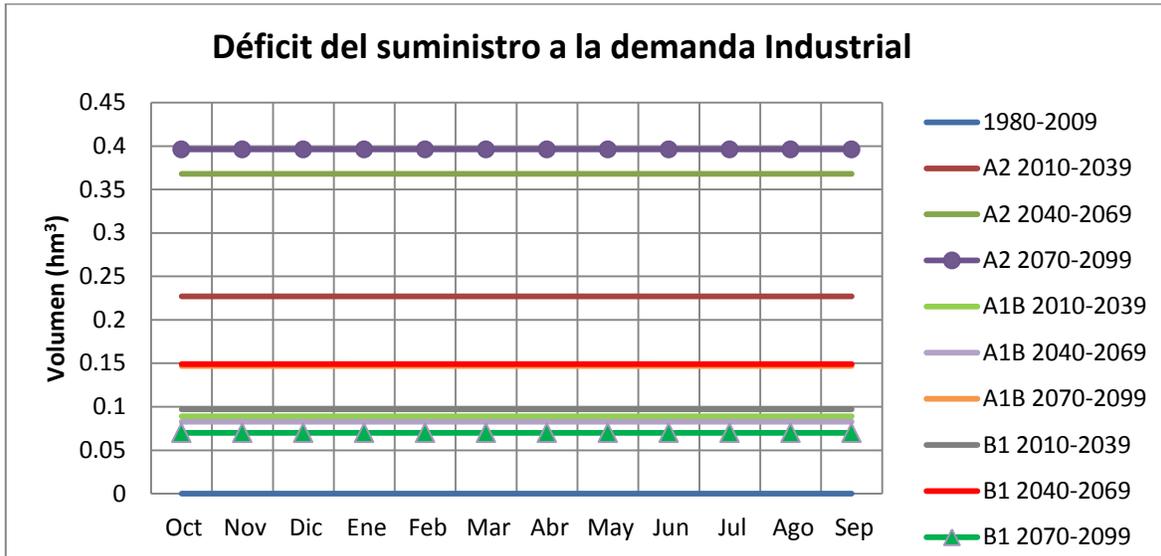


Figura 5.94 Déficit mensual en volumen para los diferentes escenarios de cambio climático aplicados a la demanda industrial CEPAMISA.

5.8.6 Déficits en el sistema de gestión de la cuenca del río grande de Morelia

De manera general en la tabla 5.24 se presentan los déficits de suministro a la demanda para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (4 Módulos) además se expresa en porcentaje la demanda que se da en los meses de marzo, abril y mayo que es donde se presenta entre el 89.55% y 97.45% de la demanda anual.

También se presenta el déficit a la demanda urbana de Morelia donde los déficits se encuentran en un rango de 12.30 hm³/año (A1B 2010-2039) a 70.61 hm³/año (A2 2070-2099). Para la demanda industrial se presentan déficits que van de 0.84 hm³/año (B1 2070-2099) a 4.75 hm³/año (A2 2070-2099).

El déficit del suministro la demanda del sistema de la cuenca del río Grande debido al cambio climático se estima mediante la línea evolutiva A2 incrementos de 40 hm³ cada periodo de 30 años, la línea evolutiva A1B presenta incrementos en los déficits de 22.29 hm³ a 50.28 hm³ y la línea evolutiva B1 presenta incrementos en los déficits de 25.04 hm³ incrementándose hasta casi 52 hm³ y posteriormente reduciéndose hasta 43.15 hm³.



Escenario	DR 020 M-Q (hm ³)	DR marzo mayo (hm ³)	Urbana (hm ³)	Industrial (hm ³)	Sistema (hm ³)
1980-2009	0.54	27.81%	0.28	0.00	0.82
A2 2010-2039	21.33	97.45%	17.95	2.72	42.00
A2 2040-2069	30.39	93.55%	45.27	4.42	80.08
A2 2070-2099	45.50	89.55%	70.61	4.75	120.86
A1B 2010-2039	8.93	91.61%	12.30	1.07	22.29
A1B 2040-2069	18.11	93.61%	29.49	1.00	48.59
A1B 2070-2099	23.12	91.58%	25.39	1.76	50.28
B1 2010-2039	9.73	94.27%	14.14	1.16	25.04
B1 2040-2069	18.89	95.30%	31.28	1.79	51.96
B1 2070-2099	18.86	92.57%	23.46	0.84	43.15

Tabla 5.24 Déficits en promedio anual para las diferentes demandas del sistema de la cuenca del río Grande.

5.8.6 Descenso del nivel estático en el acuífero Morelia-Queréndaro.

El nivel estático desciende de manera importante para el siglo XXI, debido a que para el acuífero Morelia-Queréndaro el déficit del suministro a la demanda se incrementa, los descensos que se presentan a continuación son manteniendo las condiciones actuales, esto se debe a que el acuífero se encuentra vedado y por lo tanto no se puede incrementar el suministro en el mismo.

Los descensos más importantes se dan en la zona de Morelia, debido a la sobreexplotación que se da principalmente para la demanda urbana, estos abatimientos se incrementarán a lo largo del tiempo, debido a que en la actualidad se tiene déficit en este acuífero y donde se espera que la dirección de flujo subterráneo se vea afectada en las zonas cercanas a Morelia convergiendo la dirección del flujo hacia Morelia.

Los descensos en los niveles estáticos del Módulo 3 y 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se ven menos afectados que la zona de Morelia, esto se debe a que la dirección de flujo subterráneo es hacia esta zona, de las diferentes partes altas del acuífero.

En la figura 5.95 se muestra el descenso del nivel estático mensual para los años 2009-2099 para la zona de Morelia, el Módulo 3 y 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, donde se observa que para finales de siglo a pesar de que Morelia tienen una elevación del terreno natural mayor que los Módulos 3 y 4, los niveles estáticos serán muy similares en caso de seguir explotando el acuífero de la misma manera que en la actualidad.

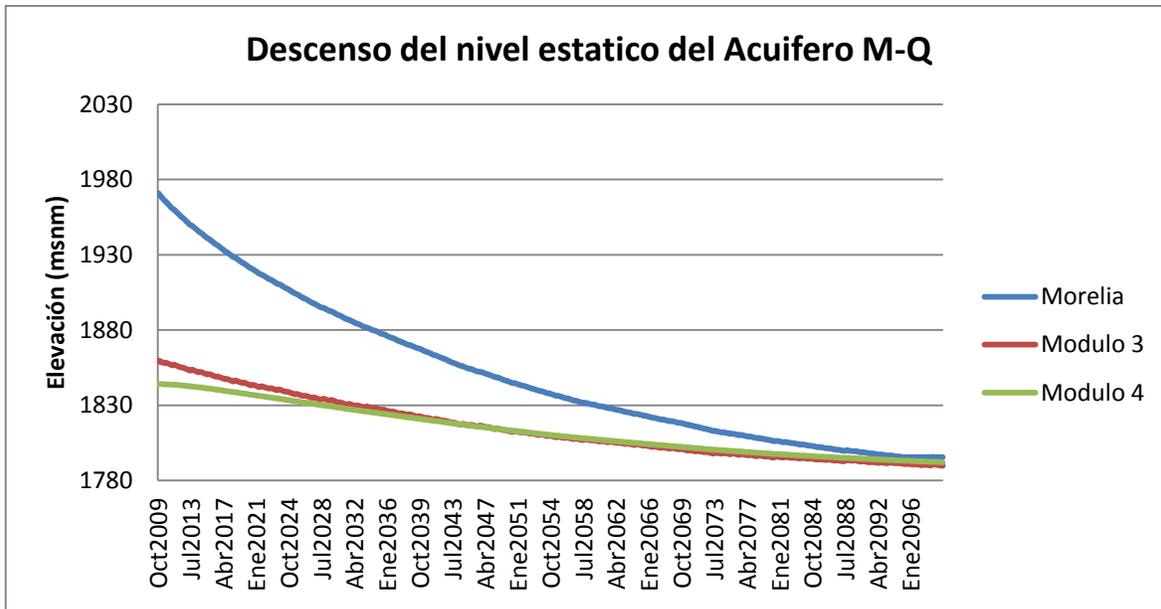


Figura 5.95 Evolución mensual del nivel estático en el acuífero Morelia-Queréndaro para los años 2009-2099.

En promedio mensual la disminución de los niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro se reducen de manera importante donde los descensos para la demanda Morelia son de hasta 176 m para finales de siglo, para el Módulo 3 los descensos son alrededor de 70 m y para el Módulo 4 que es el menos afectado los descensos son de 52 m. en la figura 5.96 se muestran los niveles piezometricos promedio para las diferentes zonas del acuífero Morelia-Queréndaro.

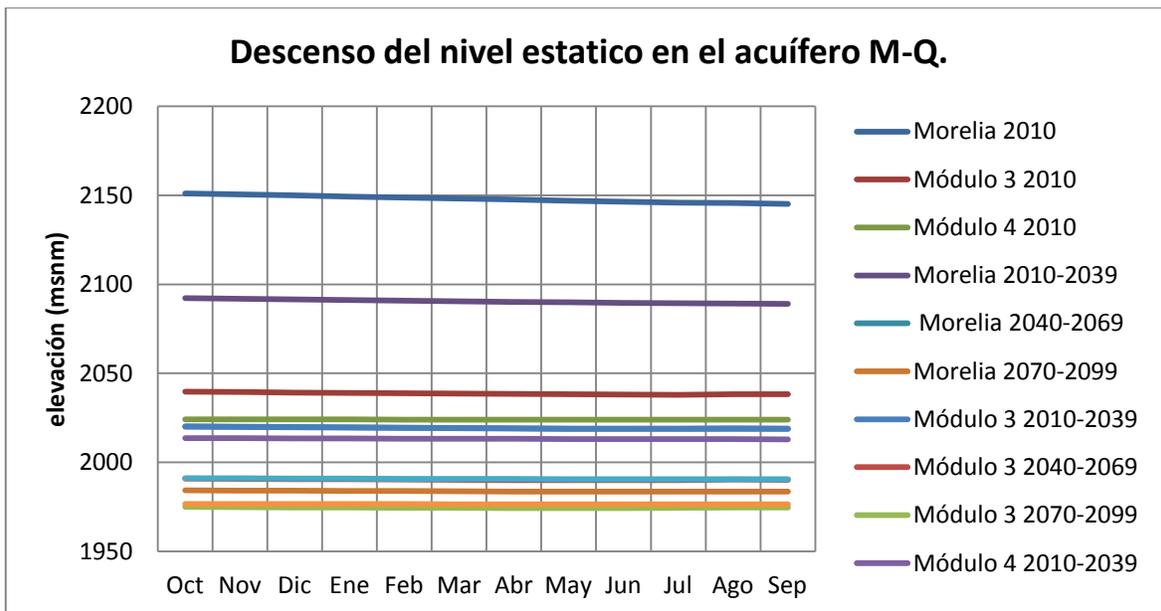


Figura 5.96 Nivel estático medio del acuífero Morelia-Queréndaro para los años 2009-2099.



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la actualidad toda la infraestructura hidráulica se diseña con las condiciones climáticas actuales e históricas, más sin embargo para el futuro y debido a que el clima se encuentra en constante cambiando esta infraestructura puede ser insuficiente o inadecuada.

Debido al cambio climático, las diferentes variables climáticas se verán afectadas de manera importante como el incremento de la temperatura y a la disminución de la precipitación y por lo tanto es importante desarrollar estudios de manera integral que nos permitan planificar los recursos para el futuro.

La gestión integrada de los recursos hídricos es muy importante debido a que a través de ella podemos conocer el estado actual de las cuencas desarrolladas y ver la problemática que se presenta en la actualidad, así como ver la opción de plantear soluciones que nos permitan un mejor aprovechamiento del agua. En base a la gestión integrada podemos hacer la planificación de los recursos hídricos, el diseño de nueva infraestructura, el tipo de cultivo, el área de cultivo, la operación de embalses y el suministro a la demanda. La gestión integrada requiere de la utilización secuencial de diversos modelos de simulación climáticos, hidrológicos y de gestión de los recursos hídricos, los cuales han sido validados en los últimos años debido a su uso cotidiano.

La modelación del clima más confiable en la actualidad se realiza a partir los MCGAO-A donde podemos conocer sus anomalías y dispersiones. Los modelos climáticos tratan de representar la evolución del clima a lo largo del tiempo mediante ecuaciones que expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático.

Debido a que se requiere conocer el cambio climático de manera regional es necesario contar además de los modelos globales con **modelos regionales** que nos permitan conocer de manera espacial y temporal un gran número de variables como la temperatura mínima, temperatura máxima, humedad del suelo, precipitación, escurrimiento, entre otros. En la actualidad se dispone de resultados de modelos regionales a partir de los resultados de los modelos generales de circulación océano-atmósfera.

Los modelos regionales de clima (RCM, por sus siglas en inglés) son considerados como la mejor técnica para realizar proyecciones reales de cambio climático a escala regional. Los modelos regionales son esencialmente similares al módulo atmosférico de cualquier MCGAO-A, pero se aplican a un área limitada de la tierra con mayor resolución, es decir discretizando espacialmente con celdas de menor tamaño y anidándolos en la malla del modelo global.

El modelo de simulación hidrológica Témez nos permite conocer el ciclo hidrológico principalmente superficial, donde a partir de él podemos conocer los escurrimientos superficiales y las recargas al acuífero. A pesar de ser un modelo agregado nos ha permitido obtener muy buenos resultados para la representación del clima actual.



A partir del modelo de Témez se han desarrollado modelos distribuidos para la representación del ciclo hidrológico que es un simulador mensual del ciclo hidrológico con calidad del agua que se apoya en un sistema de información geográfica (SIG), lo que permite conocer la evolución del ciclo hidrológico de manera espacial y conocer el cualquier punto de la cuenca el escurrimiento que se efectúa.

El modelo de simulación del acuífero se llevo a cabo mediante el programa AQUIVAL fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia desarrollado principalmente para la modelación distribuida del acuífero. Este modelo nos permite realizar la simulación a escala mensual y donde se puede observar la evolución del acuífero y de los niveles piezométricos. Este modelo una vez calibrado nos permite importar los datos para hacer una simulación conjunta con el modelo de simulación del sistema de recursos hídricos.

El modelo de simulación del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Grande de Morelia fue desarrollado mediante el programa SIMGES perteneciente al Sistema Soporte de Decisión Aquatool (Andreu et al. 1996) y fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Este es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, la simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Además puede simular las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

6.1 Conclusiones de los resultados obtenidos

La **temperatura** del planeta se está incrementando debido a los efectos de los gases de efecto invernadero (GEI) y la precipitación a futuro se está reduciendo con lo cual se analizan diferentes familias de escenarios o líneas evolutivas que nos permitan conocer la evolución del clima para los años 2010-2099. Las líneas evolutivas analizadas fueron 3, cada una con tres escenarios, por lo tanto se analizaron 9 escenarios de cambio climático y un escenario base que presenta las condiciones actuales de la zona de estudio.

La línea evolutiva que presentó los mayores cambios fue la A2, seguida de la línea evolutiva A1B que presentaba la mayor dispersión mensual, es decir las condiciones extremas para esta línea evolutiva son mayores, la línea evolutiva B1 por su parte evoluciona de manera más importante en los años 2010-2039 siendo incluso mayores los cambios que las otras dos líneas evolutivas, más sin embargo para los siguientes años los cambios climáticos disminuyen incluso para los años 2070-2099 donde se incrementa la precipitación y la temperatura no se incrementa de manera importante.

La **evapotranspiración** que depende de la temperatura se incrementó en la cuenca de manera importante y fue un factor para la disminución del escurrimiento superficial y la recarga al acuífero en las tres líneas evolutivas analizadas (A2, A1B y B1) donde se presentaron las condiciones más críticas en la línea evolutiva A2 seguida de la A1B y la de menores cambios es la B1.



La evaporación en el embalse que depende de la temperatura, esta se incrementó de manera importante lo cual indica pérdidas importantes en el embalse Cointzio, la línea evolutiva A2 es la más crítica seguida de la A1B y la B1.

Los escurrimientos superficiales y la recarga al acuífero se ven afectados por la disminución de la precipitación y el incremento de la evapotranspiración siendo mayormente afectados en la cabecera de la cuenca en la aportación Cointzio. La línea evolutiva más crítica es la A2 seguida de la A1B y B1 donde la línea evolutiva B1 presento incrementos significativos para los años 2070-2099.

La demanda agrícola en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se incrementó debido a los aumentos en la evapotranspiración y la disminución de la precipitación, con lo cual podemos concluir que los cultivos en el futuro se verán afectados por el estrés hídrico y térmico, disminuyendo su producción de manera significativa. Las líneas evolutivas A2, A1B presentaron resultados similares mayores que la línea evolutiva B1.

La demanda urbana depende del incremento de la población el cual va en aumento por lo tanto la demanda urbana seguirá creciendo a lo largo del tiempo esto en el caso de la línea evolutiva A2. Para las líneas evolutivas B1 y A1B el incremento de la población es considerado el mismo por los escenarios de cambio climático, donde la población se incrementa alcanzando el máximo de población para mitad de siglo, para posteriormente disminuir y por lo tanto la disminución de la demanda urbana.

La demandas en el sistema de gestión se incrementan de manera importante, por lo tanto podemos concluir que el efecto del cambio climático en los recursos hídricos puede ser no tan significativo si analizamos las demandas aisladas, pero para el sistema de gestión como todas la variables cambian se pueden tener serios problemas en el futuro ocasionando conflictos en el manejo y el uso del agua, ocasionando cambios como por ejemplo:

-  Cambio político.-En las normas para regular y planificar los suministro urbano, agrícola e Industrial.
-  Cambio Económico.- En el encarecimiento de los productos que se cultivan en el Distrito de Riego, la disminución del rendimiento de los cultivos lo que implica una mayor necesidad de importar alimentos de otros estados o países.
- Social.- Los problemas de abastecimiento urbano afectan a la población perteneciente al área de estudio

6.2 Posibles soluciones al efecto del cambio climático

6.2.1 Problemática de la demanda urbana

El uso del agua urbano debido a que tiene la mayor prioridad es indispensable para el sistema tratar de optimizar el recurso, para esto se presentan algunas opciones que pueden reducir el consumo del agua y reutilizar una parte de la misma.



El consumo de agua para uso doméstico es importante para el sistema de la cuenca del río Grande de Morelia, por lo tanto se puede y es necesario comenzar a ahorrar agua para este sistema. Las viviendas podrían consumir un 30% menos del agua que consumen sin que el usuario percibiese cambios en el uso del agua. Si además los usuarios tuvieran conciencia y disminuyen el consumo de agua, el potencial de ahorro de agua sería muy importante.

En la figura 6.1 se muestra la distribución del consumo de agua según el uso en las diferentes viviendas en España.

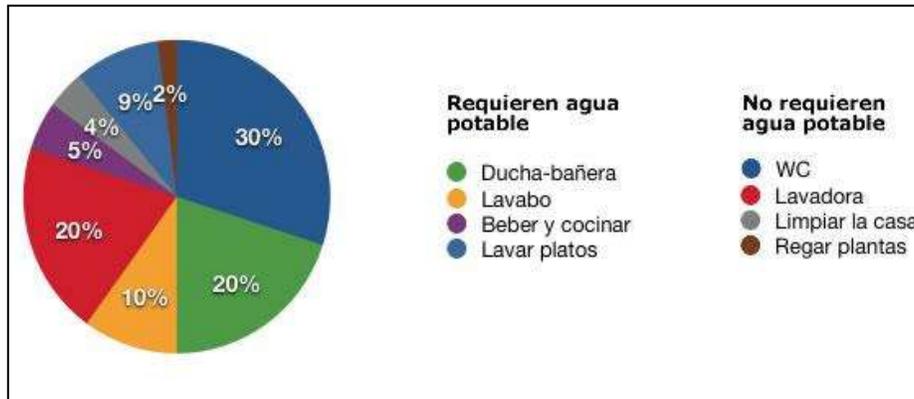


Figura 6.1 distribución del agua para la vivienda urbana fuente

Podemos observar que más un porcentaje del agua que se utiliza en las viviendas puede proceder de agua reutilizada. Evidentemente, esta agua reutilizada necesita una cierta depuración para extraer las grasas o partículas que pueda tener, pero no es necesario que esté en el mismo estado de potabilidad que el agua de beber.

Reutilizar el agua potable, junto con una cierta captación de aguas pluviales, permitiría evitar el consumo del agua para uso doméstico, independientemente de que el usuario de la vivienda esté concientizado de reducir su consumo.

Con este ahorro e incremento en la eficiencia del sistema podemos reducir los déficits futuros de manera importante, por tal motivo es importante comenzar a cambiar la mentalidad respecto al uso del agua.

Además de esta opción se presentan otras opciones que pueden ayudarnos a disminuir la demanda urbana las cuales son:

- Incremento en la eficiencia del sistema de abastecimiento de agua potable.
- Captación de agua pluvial para uso domestico.
- Utilización de aguas grises.
- Cuidado del agua.
- Diseñar sistemas de tratamiento de agua para el hogar.
- Desalinización del agua.
- Colocar medidores en los hogares e incrementar la tarifa.



6.2.2 Problemática en la demanda agrícola

Para la problemática de la demanda agrícola la opción más viable es incrementar la eficiencia de la red de conducción y distribución. La eficiencia actual del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se muestra en el capítulo 4.4.3. En este trabajo se realizó el caso hipotético donde se utilizó una eficiencia de 0.8 para todo el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. La demanda para todos los escenarios en todos los casos fue menor que para la condición actual excepto para la condición más crítica A2 2070-2099 donde el incremento debido a la demanda de cambio climático fue de tan solo el 1.76% para el Módulo 1 el rango donde se encuentran las demandas en caso de modernizar los sistemas será de 77.21% a 101.76%, es decir disminuiría la demanda para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro a pesar de los efectos del cambio climático sobre los cultivos.

Al hacer eficiente el Distrito de Riego los déficits disminuyen, quedando condicionados únicamente por la disponibilidad que se tenga del embalse Cointzio para satisfacer dicha demanda. Los resultados obtenidos es que el déficit se redujo de manera considerable para la línea evolutiva A2 (que es la más crítica analizada para el presente estudio), disminuyendo de manera muy importante con respecto a si se realiza con la eficiencia que presenta el sistema en la actualidad.

Escenario	Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro eficiencia actual (hm ³)	Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro eficiencia 0.8 (hm ³)
1980-2009	0.54	0.54
A2 2010-2039	21.33	7.11
A2 2040-2069	30.39	17.32
A2 2070-2099	45.5	29.16

Tabla 6.1 Disminución del déficit a la demanda para la línea evolutiva A2

6.2.3 Problemática en el acuífero Morelia-Queréndaro

La recarga artificial de un acuífero, también llamada gestión de la recarga de acuíferos es un método de gestión hídrica que permite introducir agua en los acuíferos (en general, agua de buena calidad y pre-tratada, aunque ha habido varias experiencias de recarga con aguas residuales). Esta agua la podemos introducir al acuífero mediante zanjas, balsas, pozos, sondeos de inyección, etc., generalmente en invierno. Esta agua es almacenada en el acuífero en cantidad superior a lo normal, y sigue su circuito natural subterráneo, depurándose durante un periodo de tiempo variable. Más tarde es extraída y empleada para diferentes usos como abastecimiento y regadío, generalmente con una calidad adecuada.

El agua que podemos utilizar para la recarga del acuífero puede ser toda el agua que en temporada de lluvias causa problemas de inundación y así podemos disminuir los efectos del cambio climático para el acuífero incrementando los niveles estáticos y la problemática de inundación que se da en la zona urbana del municipio de Morelia.



Para obtener más información acerca de las diferentes técnicas para la recarga de acuíferos en México se puede revisar la siguiente pagina donde se presentan las ponencias de las “Jornadas Técnicas sobre la Recarga Artificial Acuíferos y Reúso del Agua” que se llevo a cabo el 9 y 10 de Junio de 2011 en el auditorio de la Torre de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). http://www.agua.unam.mx/acuiferos_presentaciones.html.



7. BIBLIOGRAFÍA

Hernández B. 2007 efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar. Tesis doctoral. España.

INE 2010 .Ordoñez et al. Manual de referencia rápida para el desarrollo de inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero para los diferentes sectores en México. México.

IPCC (2001). Tercer informe de evaluación. La base científica. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

UNAM 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Víctor Orlando Magaña Rueda Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México. México

IPCC 2008. Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido.

SEMARNAT 2009. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales acuíferos de la región hidrológico-administrativa 4 "balsas" diario oficial de la federación viernes 28 de agosto de 2009 cuarta sección. México

UNAM 2005. Diagnóstico Energético e Hidráulico del Estado de Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. México

INE 2004 El manejo integral de cuencas en México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE) diciembre de 2004. México.

CONAGUA 2009a. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), estado de Michoacán diciembre de 2009. México.

CONAGUA 2009b. Desarrollo de un modelo de sistema de información geográfica y revisar e identificar las parcelas que requieren actualización en el padrón de usuarios del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. CONAGUA Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola Gerencia de Distritos de Riego. Michoacán México.

CONAGUA 2009c. Estudio topobatimétrico de la presa "Cointzio" municipio de Morelia estado de Michoacán. Comisión Nacional del agua y fotogrametría y servicios profesionales, S.A. de C.V.

SARH 1977. Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Morelia-Queréndaro, Michoacán. México

CNA 1990. Estudio geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Mich. México.



Pernía et al. 2009. Cambio climático y agua subterránea .Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. (Artículo).

IPCC 2007. Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

Moreno E. et al. 2006 Efectos del cambio climático en España. Impactos sobre la biodiversidad animal.

Martínez J. Fernández A 2004 Cambio climático una visión desde México Secretaria del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de ecología. México

México cuarta comunicación ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático comisión intersecretarial de cambio climático (13 secretarías participantes y dos invitados permanentes noviembre 2009. México.

IPCC 2000 Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC Escenarios de emisiones 2000 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Nava F. 2009.Cuando la gestión del agua se vuelve problemática: el caso de México 2006 Observatorio de las Américas. Artículo. México.

Ramsar 2004. Asignación y manejo de los recursos hídricos junio. Ramsar Convencion sobre humedales. (Artículo).

INE SEMARNAT 2006. México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (10 secretarías participantes). México.

FAO 2009a. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio de la FAO Riego y Drenaje 56 2009. Roma.

FAO 2009b. Manual de ayuda del programa CPROWAT 8.0 basado en la publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO. Roma.

Soto A. 2009 Modelación hidrológica cuasi-distribuida para su aplicación a las condiciones mexicanas, caso cuenca del río Grande de Morelia, procedimiento de preparación de información, calibración y puesta en marcha. Tesis de Licenciatura. México.

SIAS (1997). Sistema de información de aguas superficiales. Instructivo de operación. Comisión Nacional del Agua. México.

CLICOM (2010) climating Computing Program. Base de datos Meteorológicos, Servicio Meteorológico Nacional, México.

Aparicio, F. 2005. Fundamentos de hidrología superficial. Editorial Limusa. Grupo Noriega. 83p. México, DF.



Andreu, J.; Solera, A.; Capilla, J.; Ferrer, J. 2007. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Témez, J. 1977. Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. ASINEL.

FAO 2008a. Perfil para el cambio climático. Programa Colaborativo de Naciones Unidas sobre Reducción de las Emisiones Derivadas de la Deforestación y Degradación de los Bosques en Países en Desarrollo.

FAO 2008b. Conferencia de alto nivel sobre la seguridad alimentaria mundial: los desafíos del cambio climático y la bioenergía. Roma.

Agenda del agua 2030 Comisión Nacional del Agua Marzo de 2011. www.conagua.gob.mx

FAO 2002 Agricultura mundial hacia los años 2015/2030 informe resumido, Roma Italia.

CONAGUA 2009e. Cálculo de la disponibilidad de agua en los acuíferos de México Gabriel Salinas Caballeros octubre semana de la ingeniería de ciencias de la tierra.

UPV. 1997. Módulo para el preproceso y modelación de acuíferos departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente. España

CONAGUA 2011. Diálogos por el agua y el cambio climático; un llamado a la acción. México.

CONAGUA 2011 y SEMARNAT 2011. Estadísticas del agua en México. México.

UNAM 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional primera versión. Centro de ciencias de la atmósfera de la UNAM

INE y UNAM 2010. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector

IPCC 2001. Cambio climático 2001 Contribución de los Grupos de Trabajo I, II, y III al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Solera A. Paredes J. Andreu J. 2007. AQUATOOLDMA Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas. MANUAL DE USUARIO Versión 1.00. UPV España.

NOM-011 CNA-2000. Norma Oficial Mexicana sobre la conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación. SEMARNAT 2000. 17p. México.



Martínez P. 2007. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (SEMARNAT) subsecretaría de planeación. Morelos, México.

Martínez P. Aguilar A. 2008. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (SEMARNAT) subsecretaría de planeación. Morelos México.

Barajas J. 2000. Simulación de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río grande de Morelia (Modelo SIMGES) Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán México.

Collazos 2002. Método de los autovalores paso a paso. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia España.

Sahuquillo A 1992. Nuevo método para resolver modelos matemáticos de acuíferos en forma continua en el tiempo, el procedimiento de los autovalores, servicio geológico de obras públicas Universidad Politécnica de Valencia. Madrid España

Ruiz J. 1998. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado en un sistema de información geográfica. Tesis doctoral. Valencia España.

Álvarez J. 1984. Aplicación del método de los autovalores al análisis de sistemas con uso conjunto de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos. Valencia España.

CONAGUA 2007. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento, datos básicos. México D.F.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)
<http://mapserver.inegi.org.mx/AHL/activaBotonesBusqueda.do>. Enero 2011

<http://www.ine.gob.mx/acerca/estudios>. Marzo del 2011

<http://cccsn.ca/?page=sdsm>. Abril 2011

<http://portal.iri.columbia.edu/portal/server.pt?open=512&objID=697&mode=2>. Abril 2011

<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg.php>. Mayo del 2011

<http://zimbra.ine.gob.mx/ETCCDI/index-sp.html>. Mayo del 2011

<http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>. Junio del 2011

<http://www.r-project.org/>. Junio 2011

<http://cccsn.ca/?page=dst-sdi>. Julio del 2011

http://loki.qc.ec.gc.ca/DAI/gcm_step11-e.html?model=HADCM3. Julio del 2011

<http://www.ipcc.ch>. Julio del 2001



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CUERPO ACADEMICO DE GESTION INTEGRAL DEL AGUA

EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GESTIÓN
DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

ANEXOS

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TESIS APOYADA POR EL CONSEJO ESTATAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MICHOACAN



PRESENTA

JOEL HERNÁNDEZ BEDOLLA

DIRIGIDA POR

SONIA TATIANA SANCHEZ QUISPE

Morelia Michoacán, Noviembre de 2011





ÍNDICE

Anexo A. Estaciones climáticas para el análisis de la cuenca del rio grande de Morelia y el acuífero Morelia Queréndaro.	1
Anexo B. Análisis de los escenarios de cambio climático para la cuenca del rio Grande de Morelia y el acuífero Morelia Queréndaro.	4
Anexo C. Evapotranspiración para las subcuencas de la cuenca del Río Grande de Morelia.....	17



ANEXO A. ESTACIONES CLIMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CUENCA DEL RIO GRANDE DE MORELIA Y EL ACUÍFERO MORELIA QUERÉNDARO.

Las estaciones climatológicas consideradas son 23. Obtenidas bases de datos CLICOM y CONAGUA (para los últimos años). La ubicación de las estaciones se encuentra dentro de las 3 zonas de estudio consideradas y se muestran en la figura A.1.

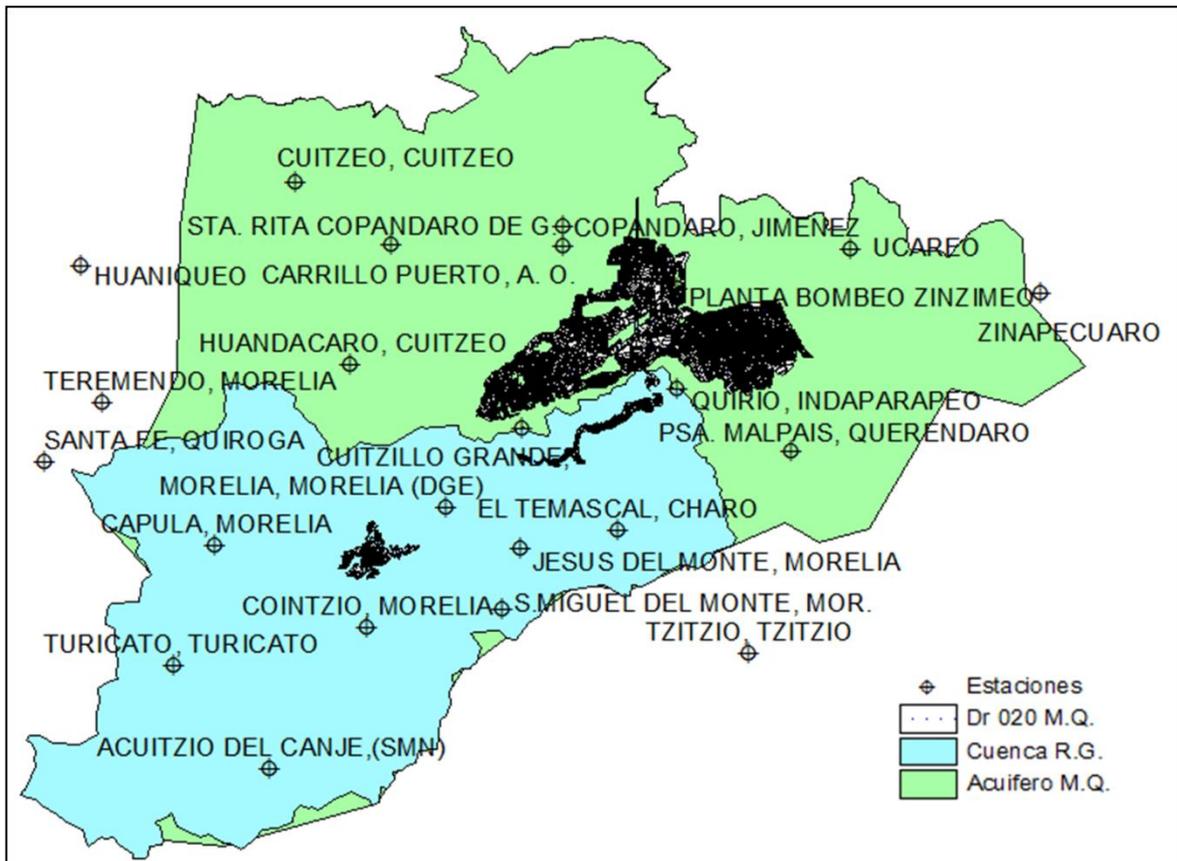


Figura A.1 Estaciones climáticas completas utilizadas en las zonas de estudio.

De las estaciones climáticas se obtuvieron los siguientes datos:

-  Temperatura mínima (°C)
-  Temperatura máxima (°C)
-  Temperatura media (°C)
-  Precipitación mensual (mm/mes)

Los registros de los datos climáticos del documento de la base de datos CLICOM (2010) corresponden al periodo de 1975 a 2006, la información contenida en este documento es de



ANEXO B. ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL RIO GRANDE DE MORELIA Y EL ACUÍFERO MORELIA QUERÉNDARO.

Los escenarios de cambio climático disponibles para la zona de estudio son los suficientes como para hacer un análisis previo de la selección de los mismos. Los escenarios climáticos regionales utilizados en esta tesis fueron los proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología (INE), donde se realizó la reducción de escala mediante la Herramienta de Predicibilidad del Clima (CPT) del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad (IRI) de Estados Unidos.

Los Modelos de Circulación General Atmosfera Océano Atmosfera (MCGAO-A) regionalizados parten los resultados del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), en su Cuarto Informe de Evaluación (AR4, 2007).

El INE (2007) presenta de más de 20 MCGAO-A usados por el IPCC, con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos de escenarios de cambio climático regionalizados para México, considerando escenarios de emisiones de GEI (A2, A1B, B1, COMMITED) con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC en el AR4. El escenario COMMITED se refiere a la suposición de mantener constantes las concentraciones de los GEI del año 2000.

Los escenarios disponibles presentan cambios mensuales para la precipitación en % y para la temperatura en °C, para el periodo 2000 a 2099. Las estaciones de cambio climático establecidas para México regionalizadas se encuentran a una distancia aproximada de 50 km distribuidos en una malla regular.

Para la cuenca del Rio Grande de Morelia, El Distrito de Riego 020 Morelia Queréndaro y el acuífero Morelia Queréndaro se cuenta 8 estaciones de cambio climático (figura B.1), es decir puntos donde se generaron los escenarios climáticos futuros y los que serán objeto del presente estudio.

Los resultados obtenidos para la zona en estudio no son estrictamente precisos, más bien se tiene una probabilidad de la ocurrencia del fenómeno. Dado que el futuro del clima dependerá de cómo sean las emisiones de gases de efecto invernadero globales y en consecuencia de la magnitud del forzante radiativo. Se tiene que pensar en que más que pronósticos del clima futuro, se harán proyecciones o escenarios de cambio climático. Hay dos fuentes importantes de incertidumbre ante el cambio climático: las incertidumbres en las emisiones futuras, que afectan el forzamiento radiativo del sistema climático y la incertidumbre en la sensibilidad global del clima y los cambios de patrones de circulación a escala regional que simulan los modelos del clima.

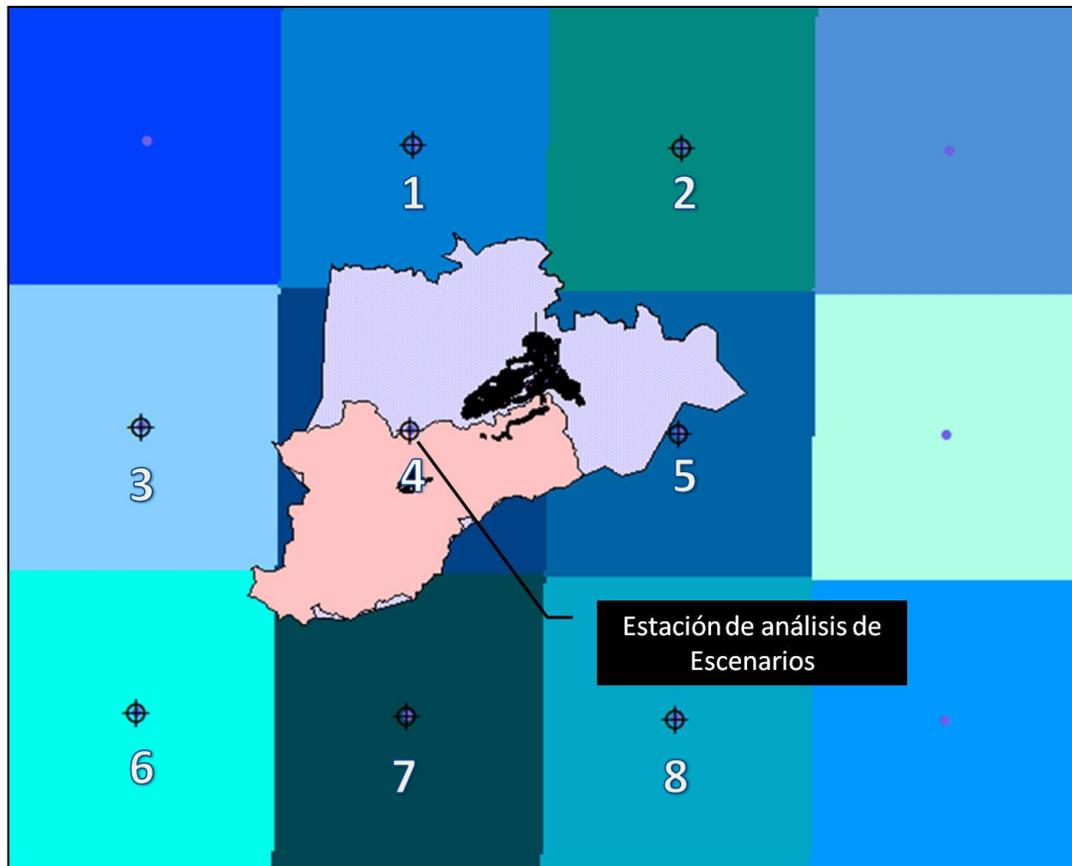


Figura B.1 Ubicación de las estaciones de cambio climático para las diferentes zonas de estudio (INE 2007).

Se han analizado todos los resultados de cambio climático regionales para la estación 4 se denominó como “estación de análisis” que es la estación que tiene mayor peso en toda el área de estudio y donde se tienen los resultados para los escenarios que se van a trabajar los cuales son: el escenario A2, que refiere a las condiciones más críticas de cambio climático, el escenario B1 establece los cambios climáticos mínimos y el escenario A1B que presenta condiciones intermedias de cambio climático, es decir de mayor impacto que las condiciones del escenario B1 y de menor impacto que el escenario A2.

Para el análisis se establecieron periodos de 30 años ya que se considera que en este periodo de tiempo se alcanza una mayor confianza en que ocurran los fenómenos e impactos de cambio climático, además de que los escenarios de cambio regionales se realizaron para este mismo periodo de tiempo (INE 2007), para calibración 20 años y 10 años para la validación. Por tales motivos se proponen los siguientes escenarios y climatologías para la temperatura media mensual y para la precipitación total:

-  Escenario actual (1980-2009)
-  A2 2010-2039
-  A2 2040-2069
-  A2 2070-2099



-  A1b 2010-2039
-  A1b 2040-2069
-  A1b 2070-2099
-  B1 2010-2039
-  B1 2040-2069
-  B1 2070-2099

Para el presente trabajo se realizó un análisis de los modelos disponibles y de la posibilidad de ocurrencia de los mismos. Cuando se tiene la disponibilidad de varios experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes, se puede realizar un promedio de los mismos generando a lo que se conoce como un ensamble multimodelo que permita conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima en base del análisis de dónde se encuentre la mayor parte de las soluciones.

El objetivo de proyectar el clima por ensambles multimodelo es proporcionar una mayor confiabilidad de ocurrencia de los estados futuros del clima. Esto nos permite estimar en nuestro sistema de recursos hídricos, qué puede suceder y cuáles son las varias alternativas que el usuario tiene para la gestión de los recursos.

Las líneas evolutivas y familias de escenarios son los siguientes:

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2. Describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

En las figuras B.2 a B.4 se muestran en la estación de análisis (4) los modelos para el escenario A2 en lo correspondiente a cambios en la precipitación y en las figuras B.11 a B.13 se observan los cambios en la temperatura, este escenario corresponde los cambios más drásticos tanto en la temperatura como en la precipitación. Se aprecia las figuras que la dispersión entre los escenarios es grande, más sin embargo para la temperatura los modelos presentan la misma tendencia; para la precipitación se tienen importantes dispersiones, donde se estiman incrementos y decrementos en la precipitación, esto se debe a que la precipitación es más difícil de proyectar debido a los procesos más complejos y por lo tanto cada modelo realiza sus propias hipótesis que no necesariamente tienen que ser validas para la zona de estudio.

La línea evolutiva y familia de escenarios A1. Describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia



de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada (todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares) **de todo tipo de fuentes (A1B).**

En las figuras B.5 a B.7 se muestran en la estación de análisis (4) los modelos para el escenario A1B en lo correspondiente a cambios en la precipitación y en las figuras B.14 a B.16 se observan los cambios en la temperatura. Este escenario presenta la mayor dispersión mensual y anual por lo tanto las temperaturas máximas y mínimas se incrementan de manera considerable respecto a otras líneas evolutivas. Se estiman incrementos en la precipitación en los meses que llueve menos y decrementos en la precipitación en los meses donde se presenta la mayor precipitación de todo el año.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1. Describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

En las figuras B.8 a B.10 se muestran en la estación de análisis (4) los modelos para el escenario A1B en lo correspondiente a cambios en la precipitación y en las figuras B.17 a B.19 se observan los cambios en la temperatura. Este escenario es que presenta las condiciones climáticas más optimistas debido a que la precipitación se ve menos afectada que en las otras dos familias, incluso para finales de siglo se estiman incrementos en la precipitación con respecto a los años 2040-2069. La temperatura al igual que la precipitación evoluciona a un menor ritmo que las otras dos líneas evolutivas, excepto para el periodo 2010-2039 donde es similar a la familia A2 y A1B.

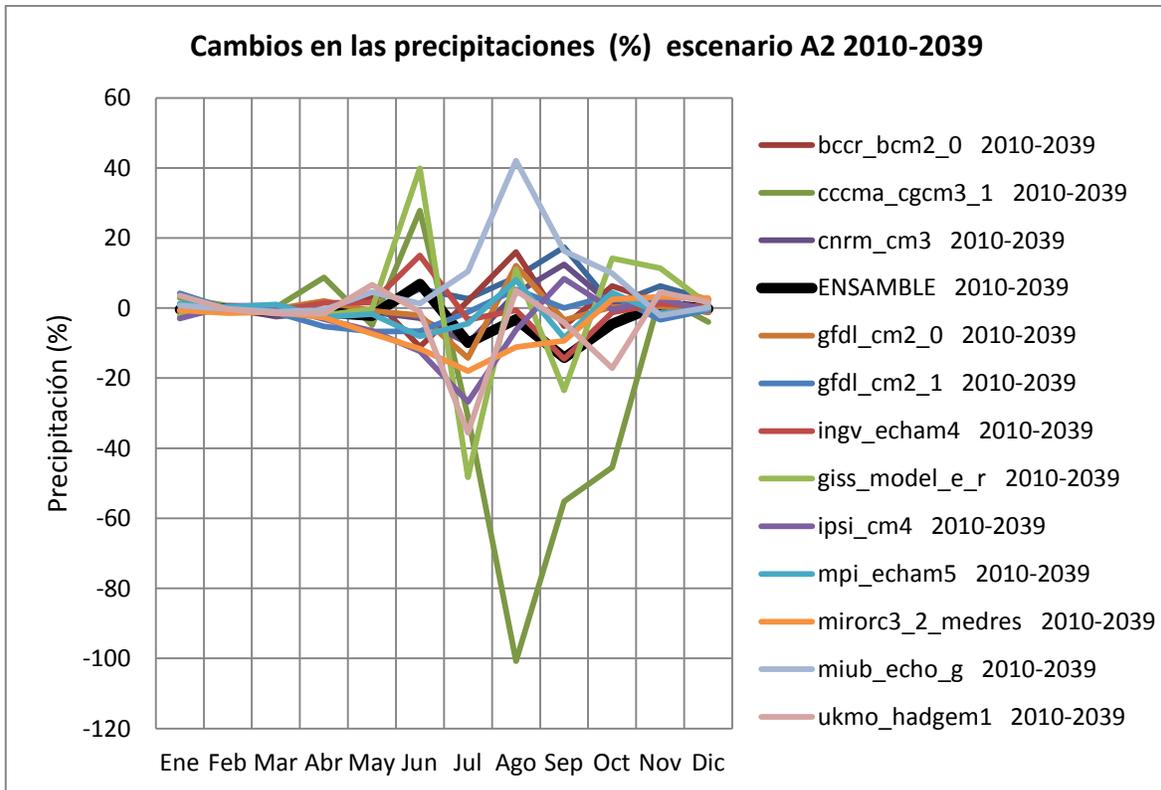


Figura B.2 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2010-2039.

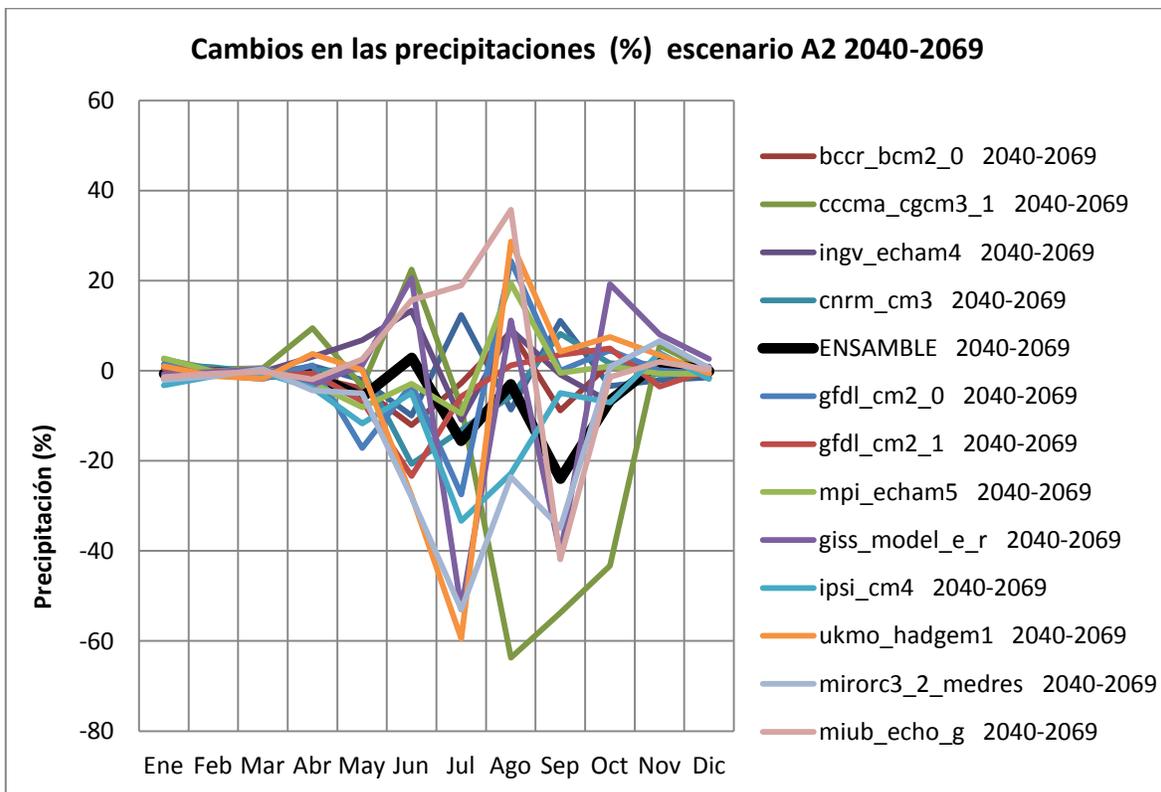


Figura B.3 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2040-2069.

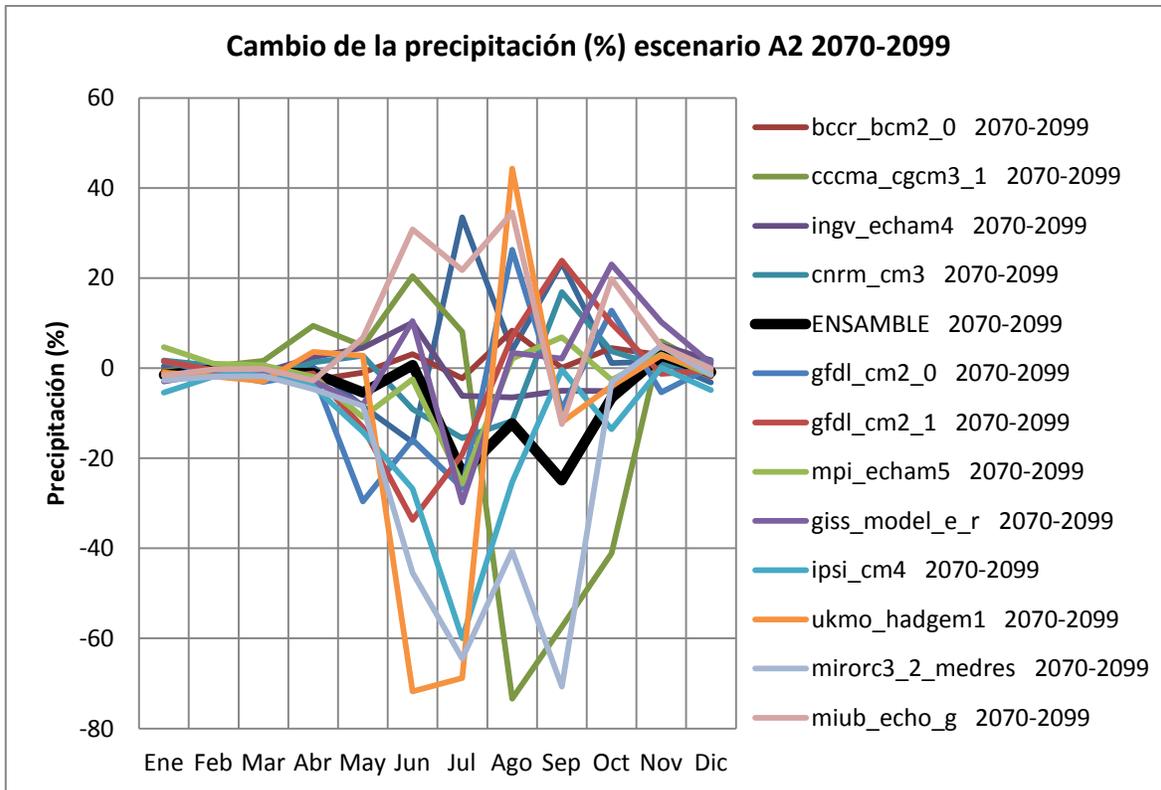


Figura B.4 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2070-2099.

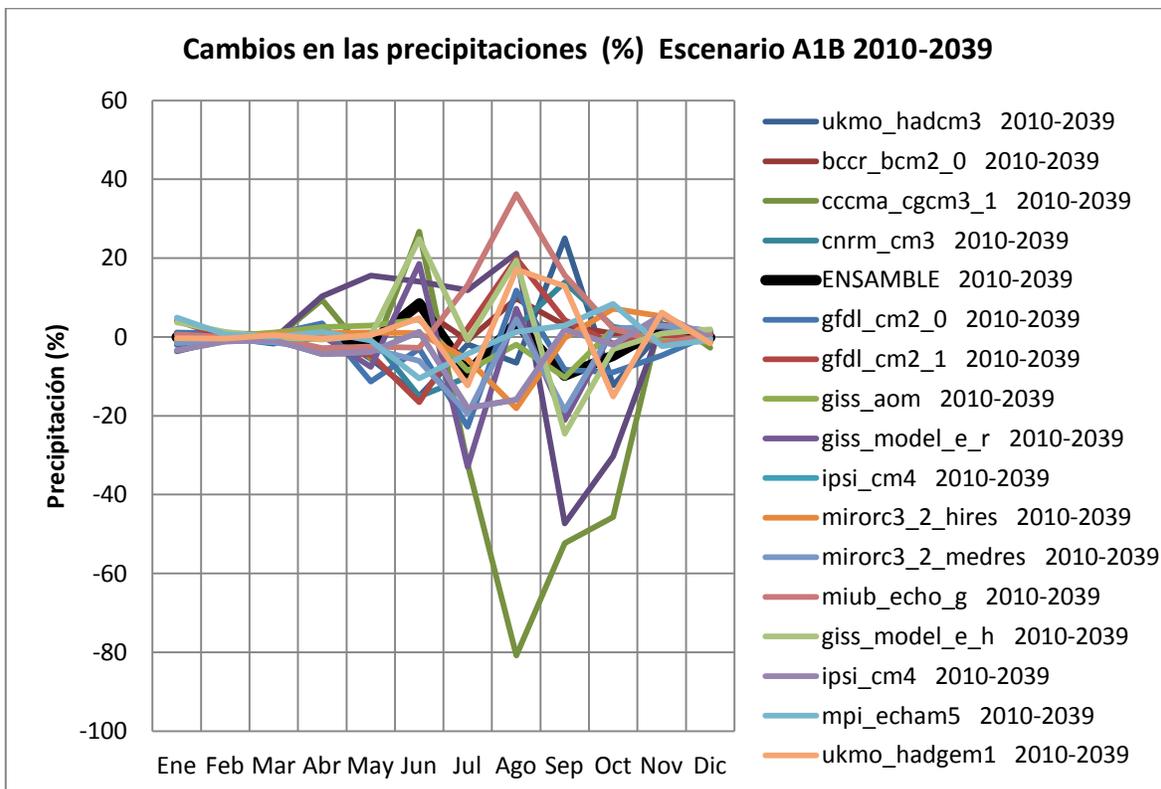


Figura B.5 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2010-2039.

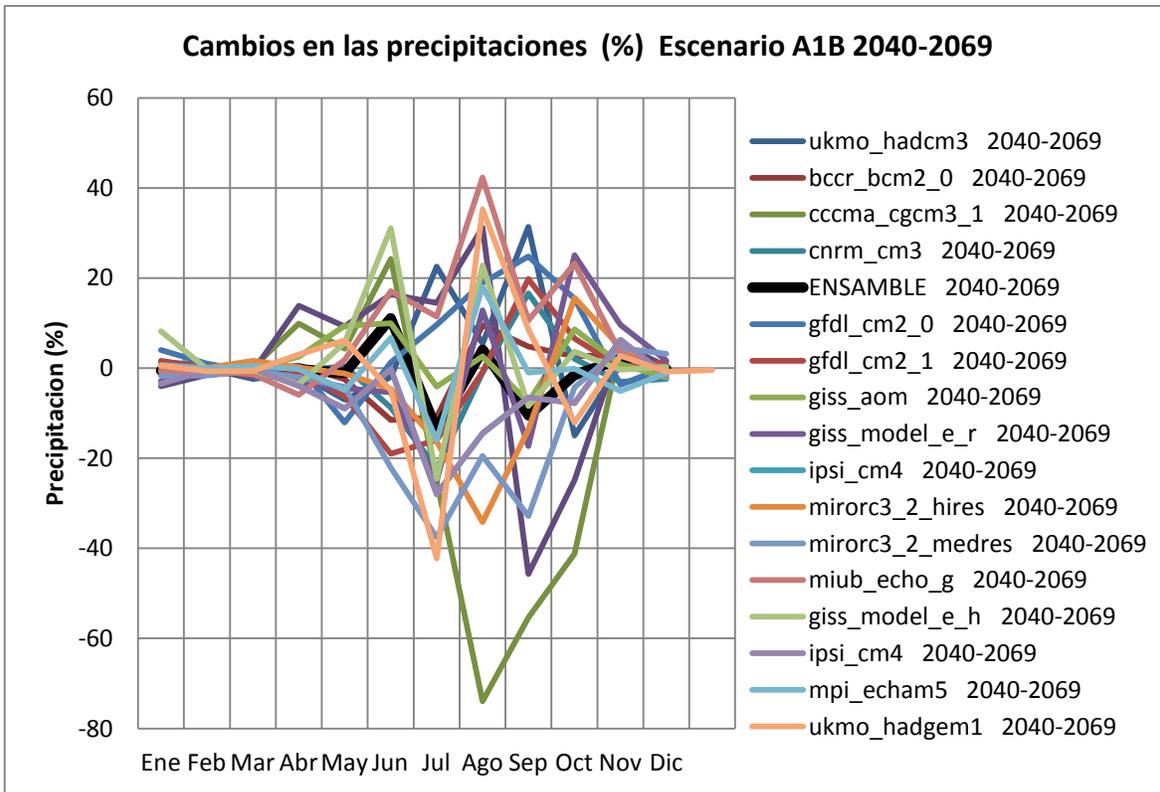


Figura B.6 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2040-2069.

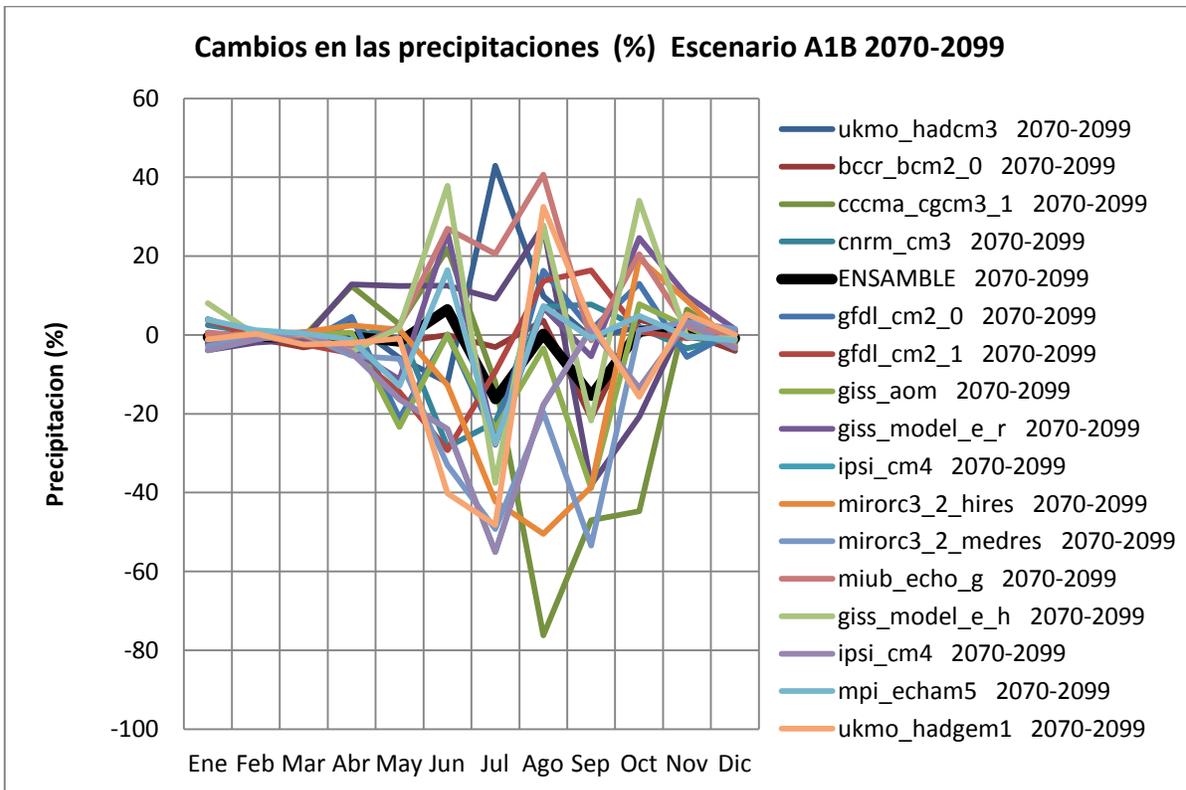


Figura B.7 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2070-2099.

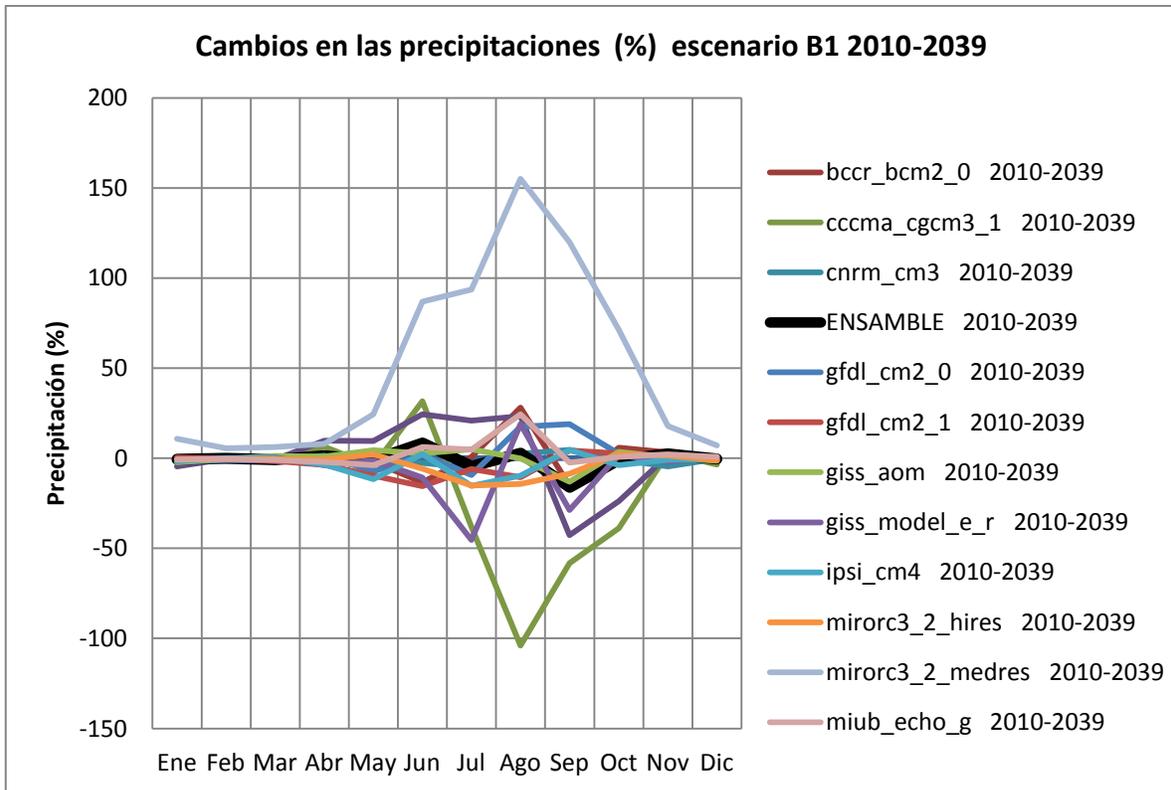


Figura B.8 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2010-2039.

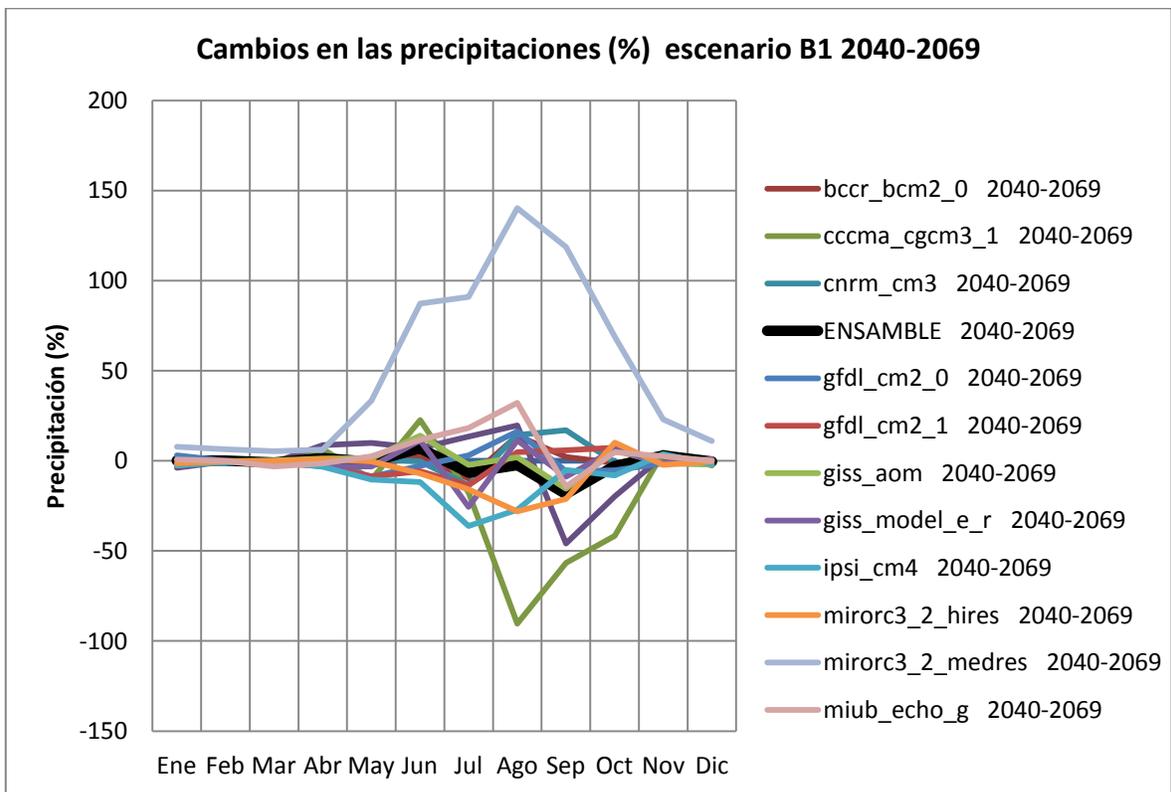


Figura B.9 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2040-2069.

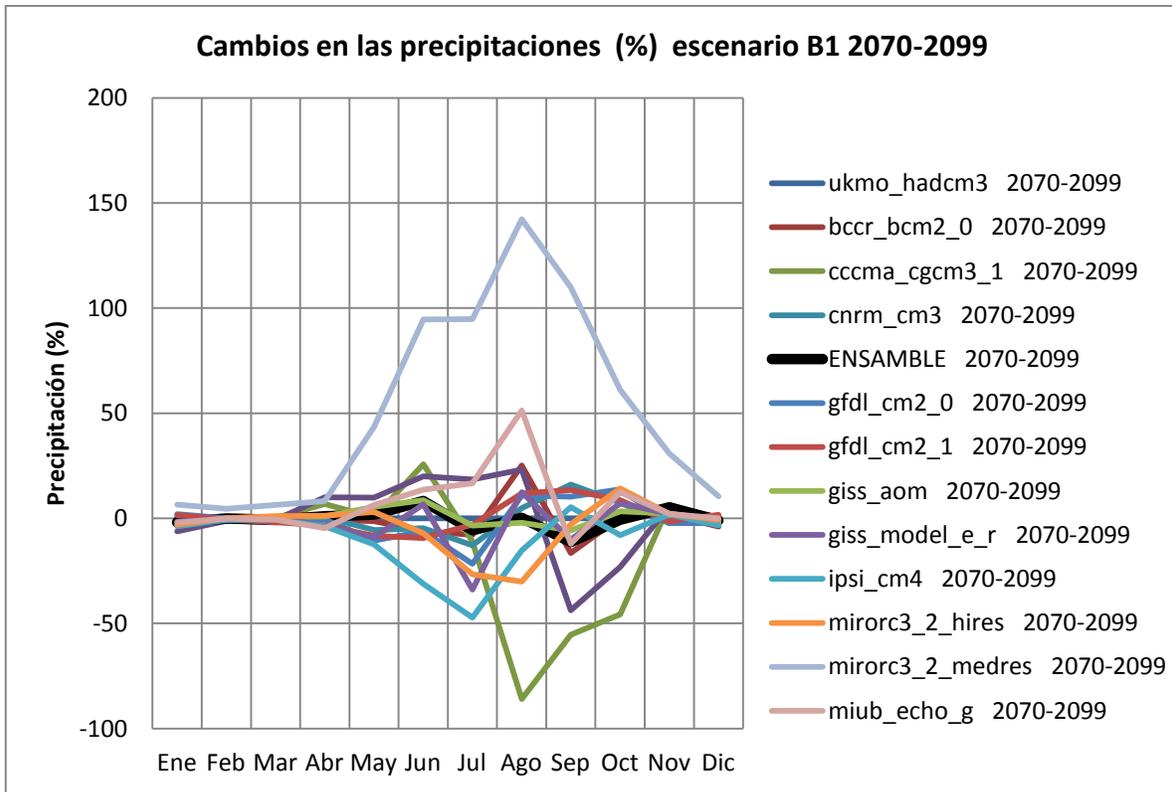


Figura B.10 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2070-2099.

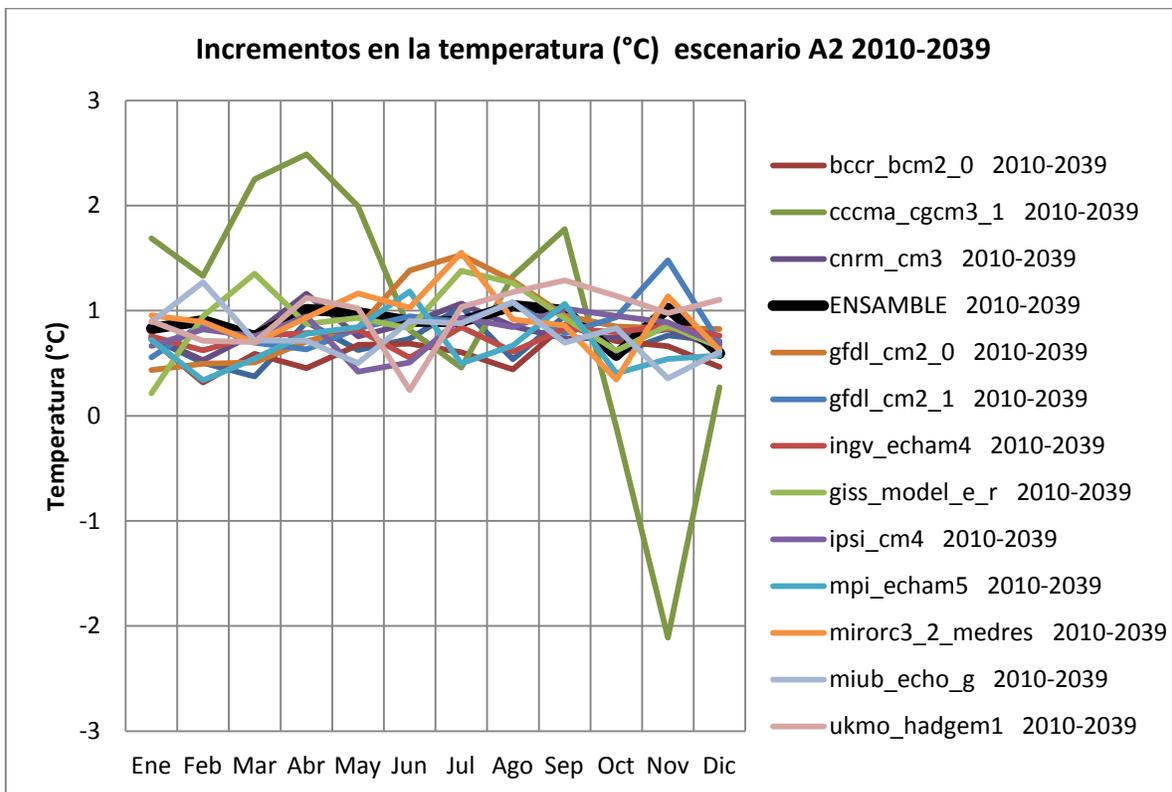


Figura B.11 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2010-2039.

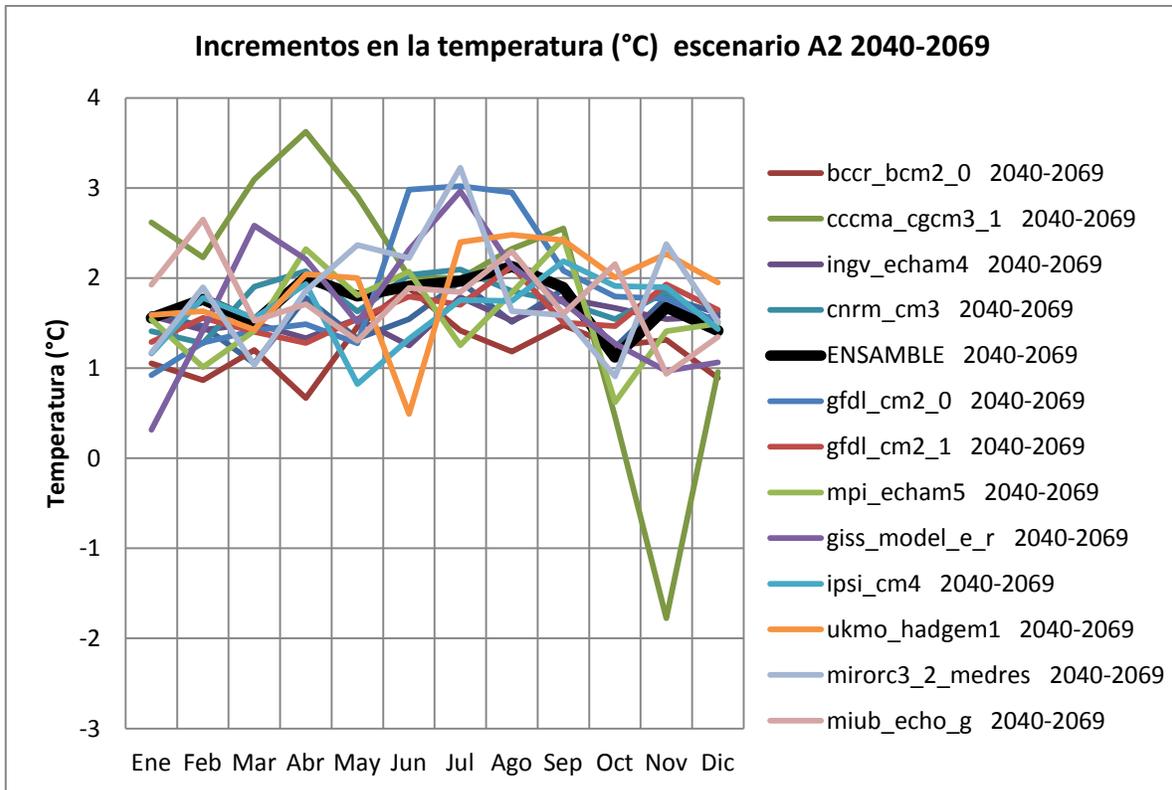


Figura B.12 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2040-2069.

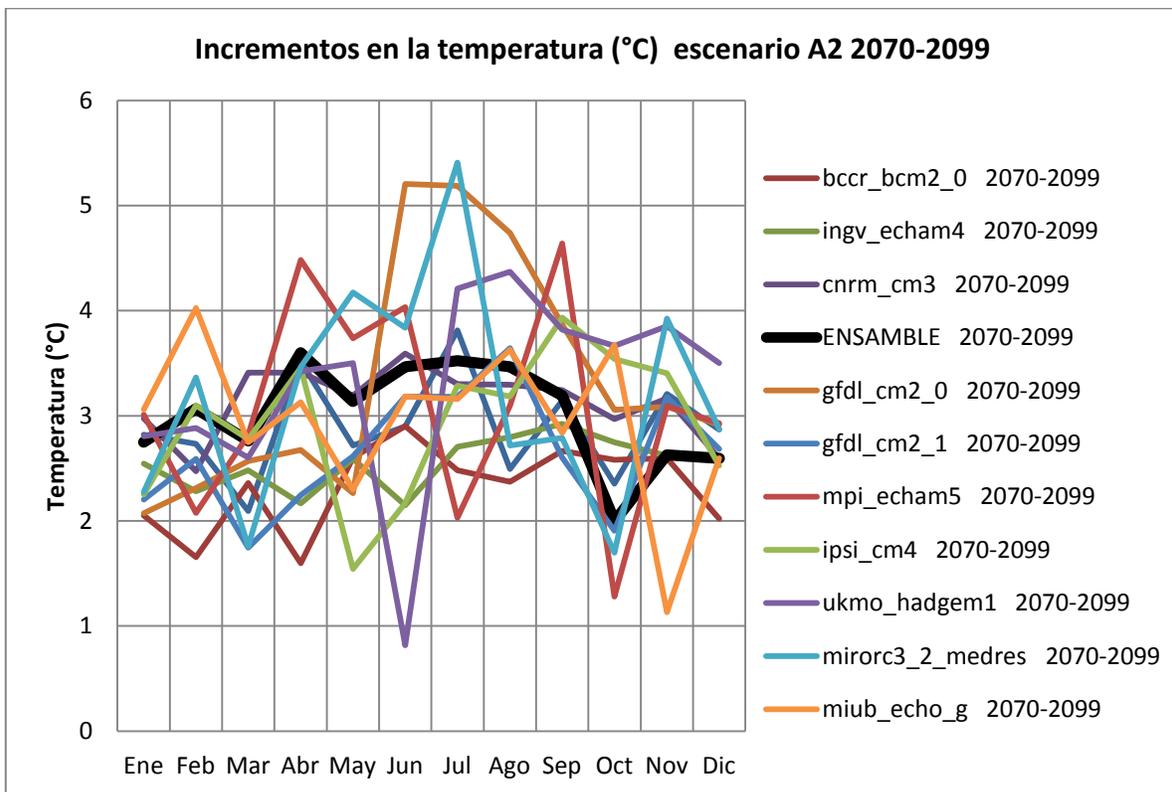


Figura B.13 Cambios en las precipitaciones para el escenario A2 2070-2099.

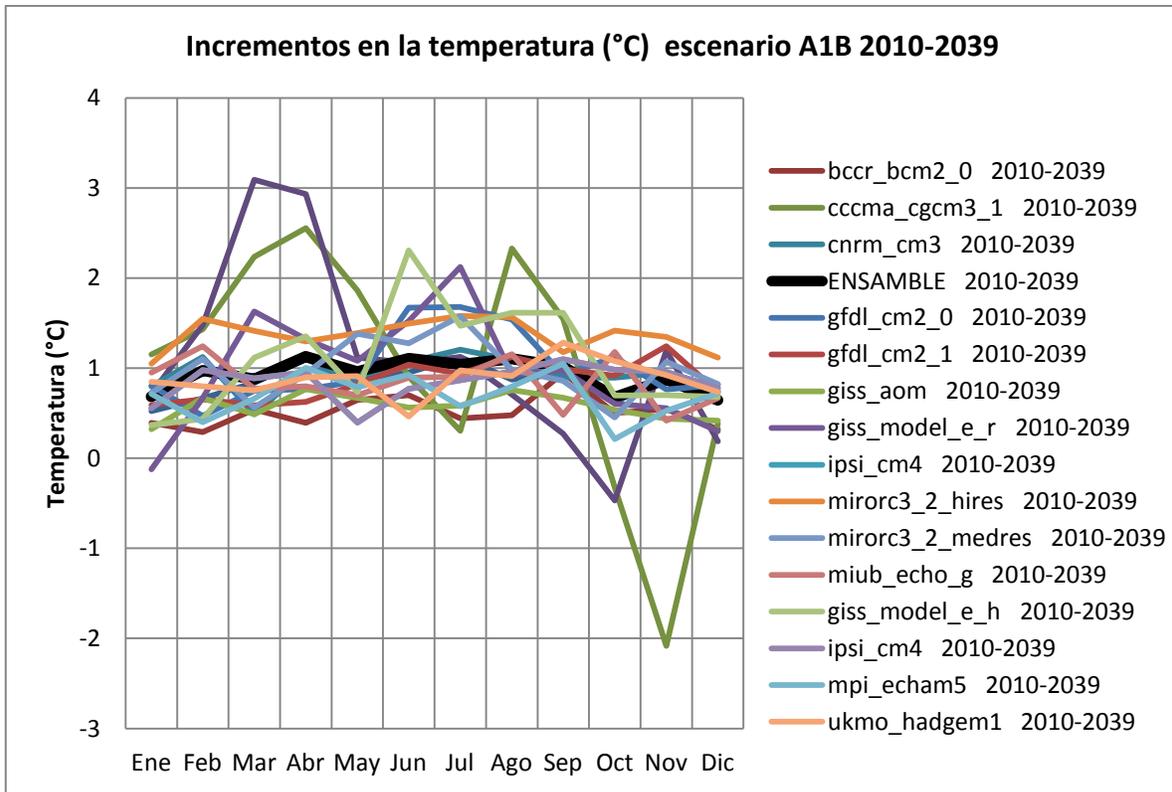


Figura B.14 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2010-2039.

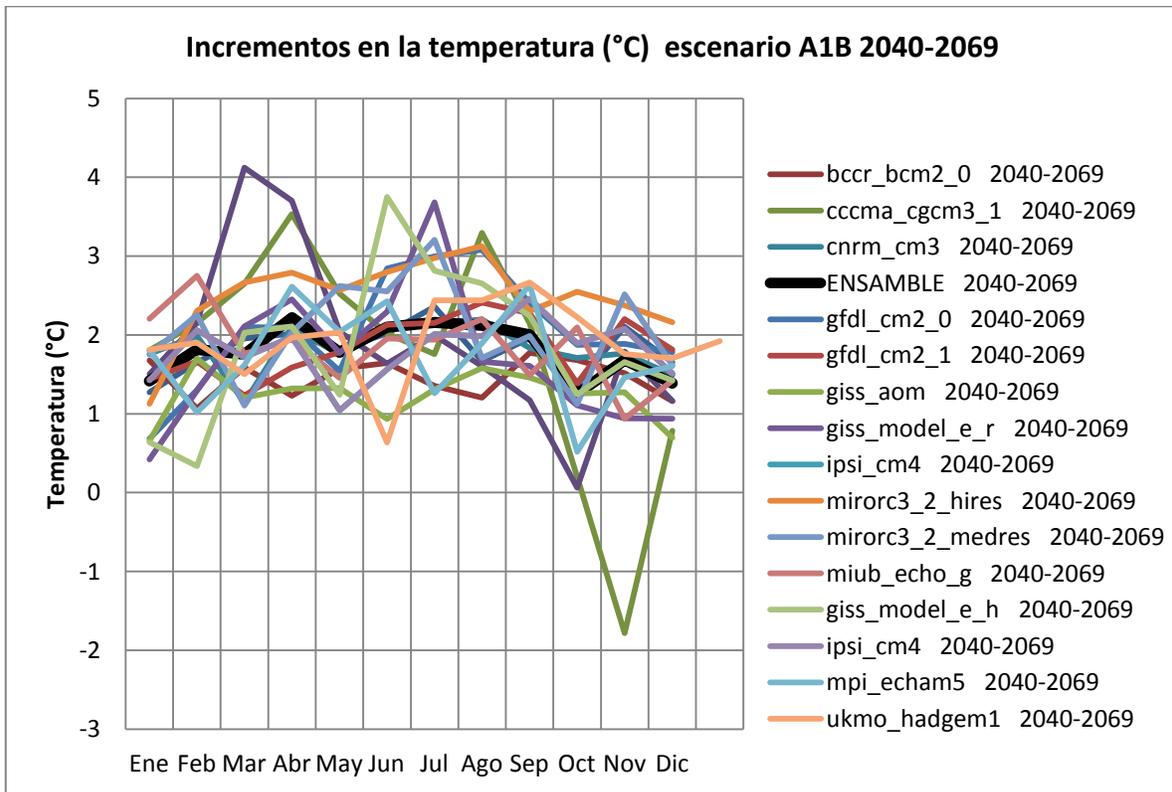


Figura B.15 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2040-2069.

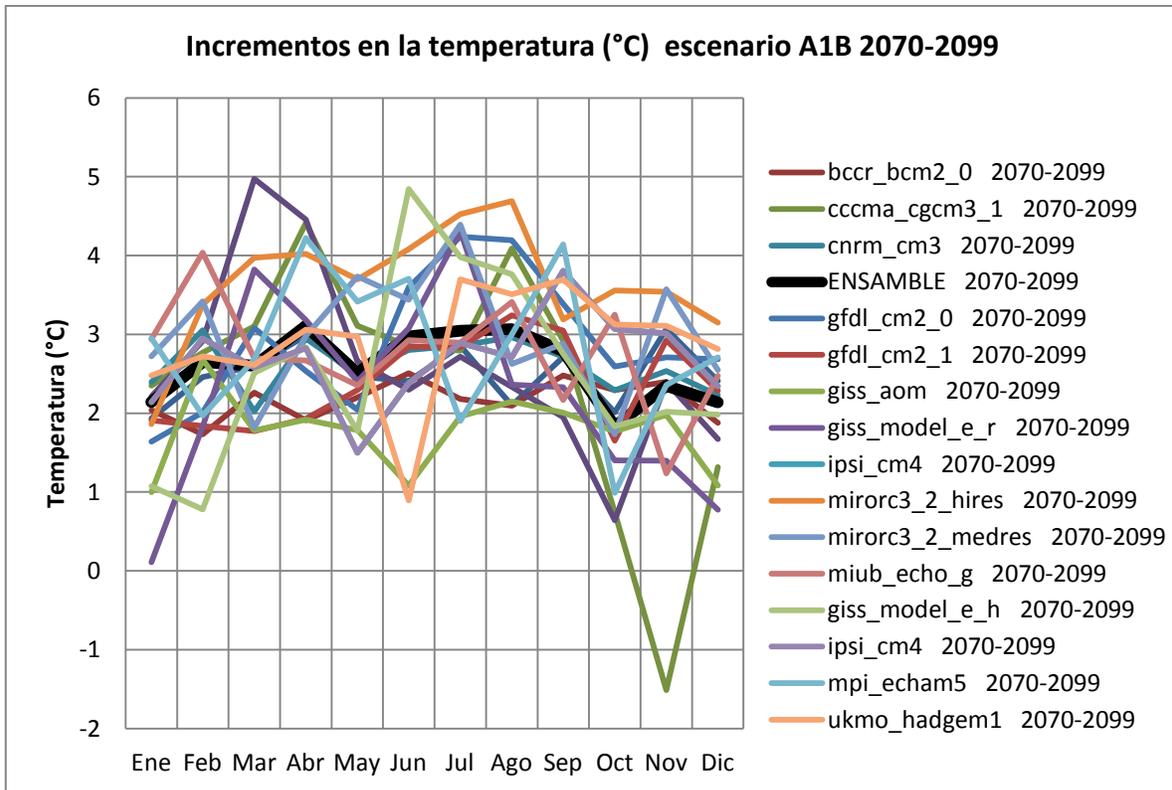


Figura B.16 Cambios en las precipitaciones para el escenario A1B 2070-2099.

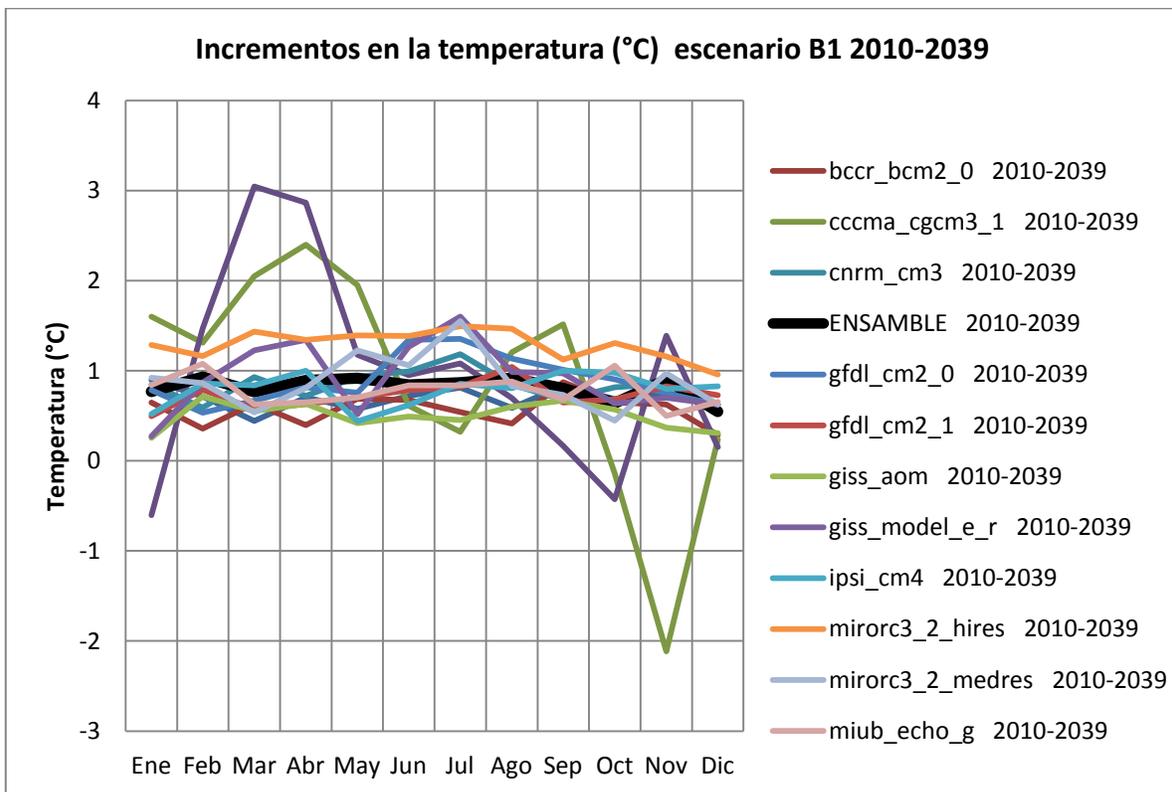


Figura B.17 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2010-2039.

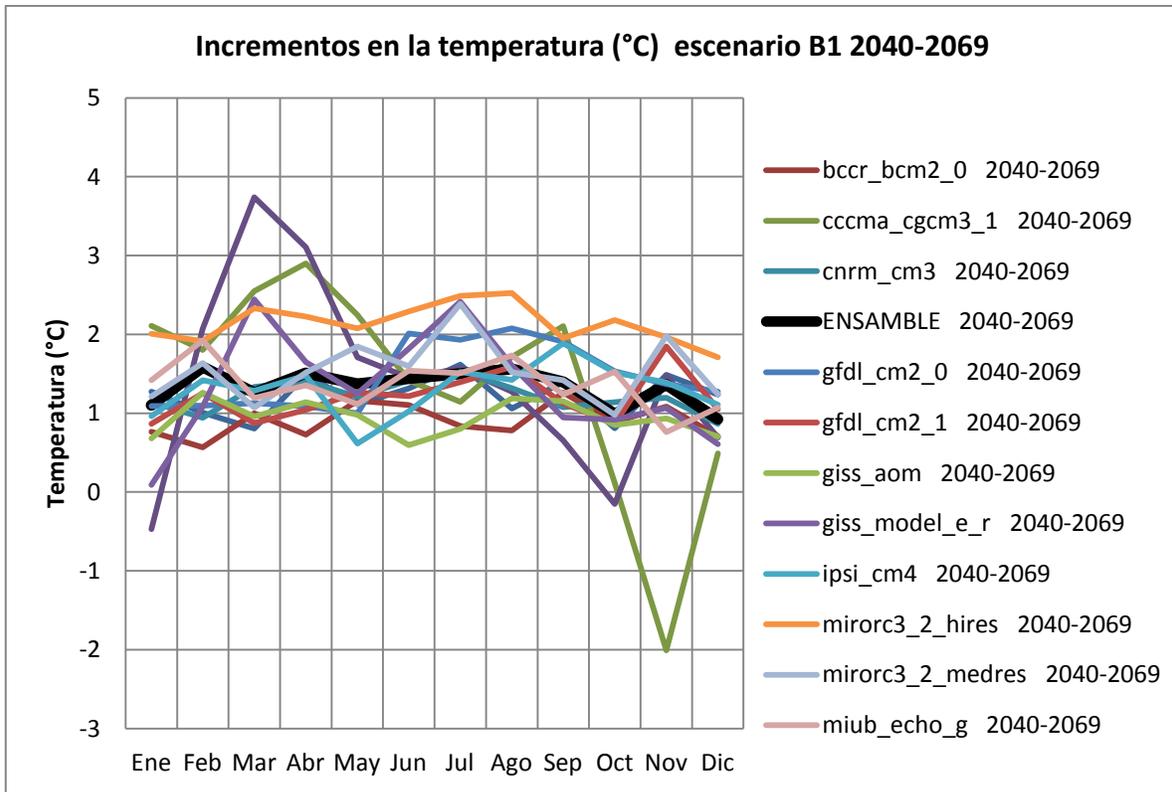


Figura B.18 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2040-2069.

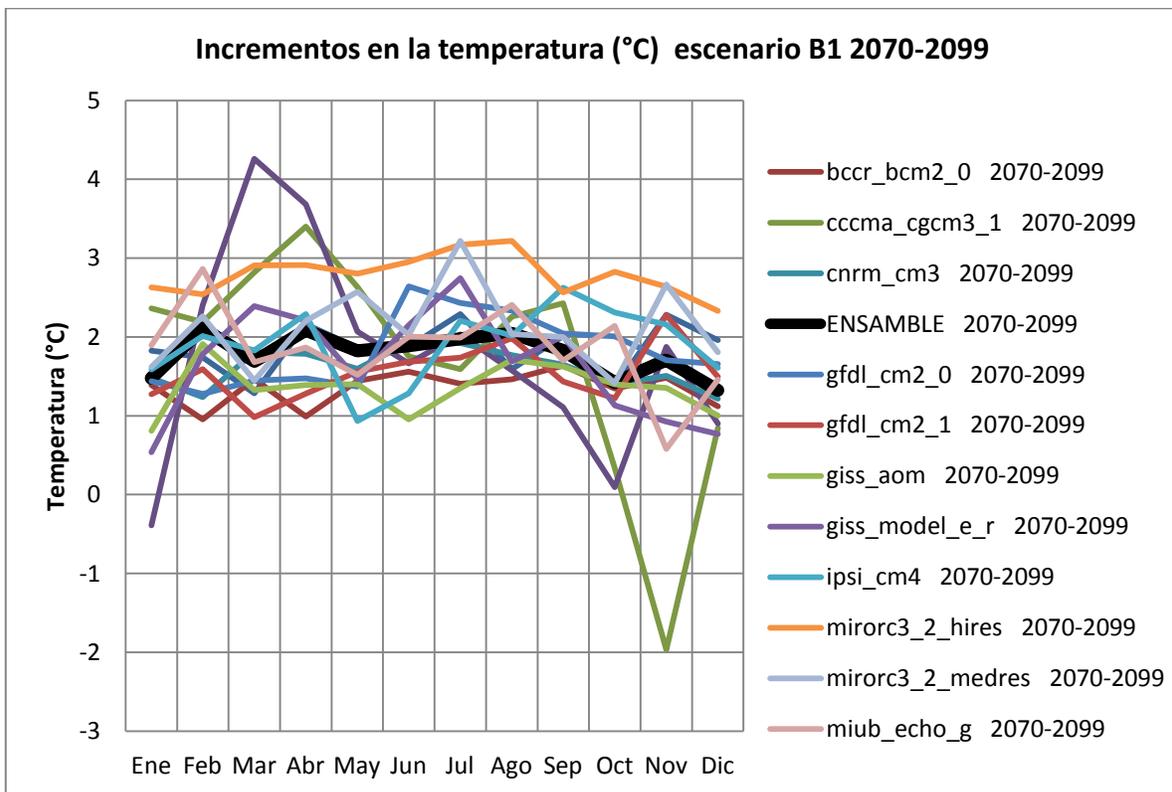


Figura B.19 Cambios en las precipitaciones para el escenario B1 2070-2099.



ANEXO C. EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA LAS SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA.

La evapotranspiración se obtiene de manera estacional para el centro de gravedad en base a las temperaturas en las diferentes zonas de estudio (anexo A), por lo tanto es necesario obtener una estación ficticia en el centro de gravedad de las subcuencas y trasladar las diferentes variables a dicha estación. El método utilizado para el traslado fue el método del inverso de la distancia al cuadrado.

El método utilizado para obtener la evapotranspiración es el de Thornthwaite, el cual requiere datos a escala mensual para la temperatura, además de una latitud definida.

Se analizaron tres subcuencas de la cuenca del río grande de Morelia y que tienen escurrimientos dentro de la cuenca del Río Grande de Morelia. Además se analizó la evapotranspiración en el Acuífero Morelia Queréndaro para observar la recarga en el mismo, tal como se muestra a continuación:

-  Subcuenca Cointzio.
-  Subcuenca Chiquito.
-  Subcuenca Atapaneo.
-  Acuífero Morelia Queréndaro.

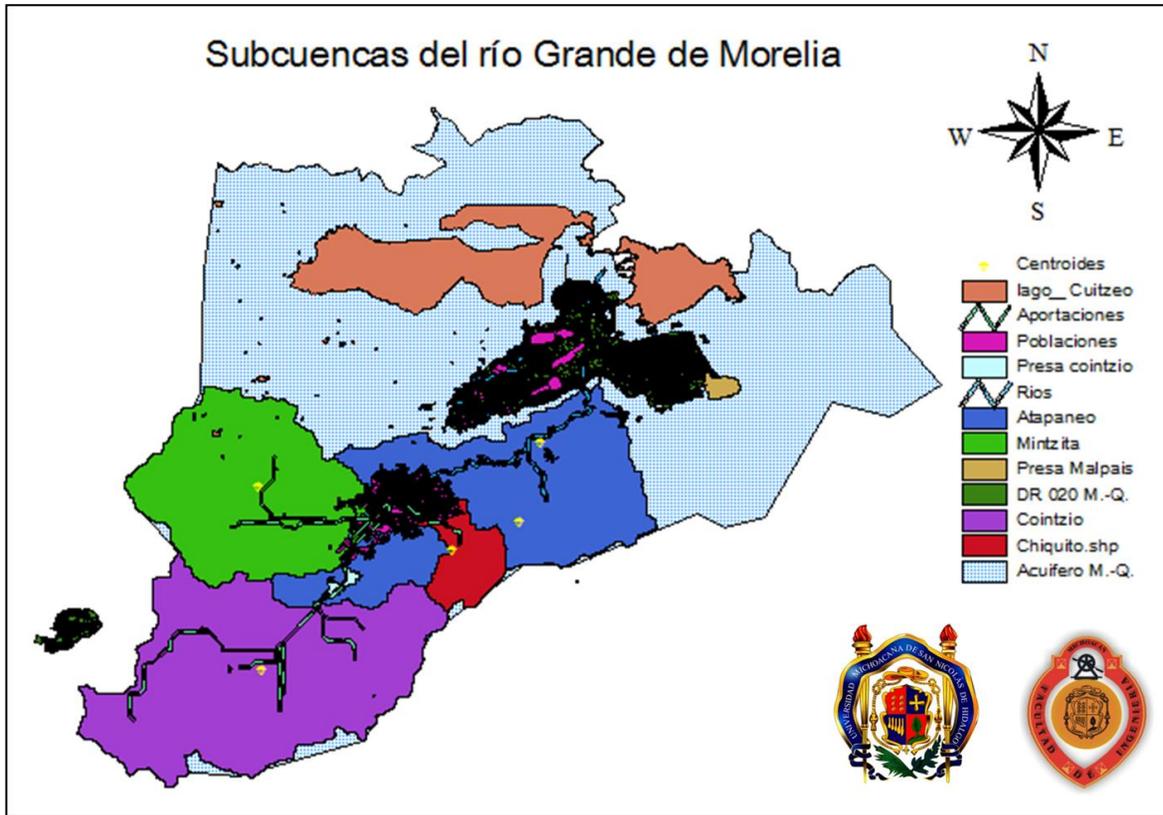


Figura C.1 Subcuencas de análisis de la cuenca del río grande de Morelia.

La familia de los escenarios A2 para los tres escenarios establecidos presenta incrementos de la evapotranspiración en los casos analizados. Para los años 2010-2039 la evapotranspiración más crítica se presenta en la subcuenca Chiquito con un incremento de 5.13%, para los años 2040-2069 el incremento más crítico es nuevamente para la subcuenca Chiquito incrementándose hasta en un 11.08% y para el periodo que comprende los años 2070-2099 el incremento es del 21.88%. Los incrementos más importantes se dan en los meses cálidos, es decir abril- septiembre, teniendo incrementos menores en los meses fríos octubre-marzo. Las figuras C.2 a C.5 muestran los resultados obtenidos para la subcuenca Cointzio, Chiquito y Atapaneo, así como el acuífero Morelia Queréndaro.

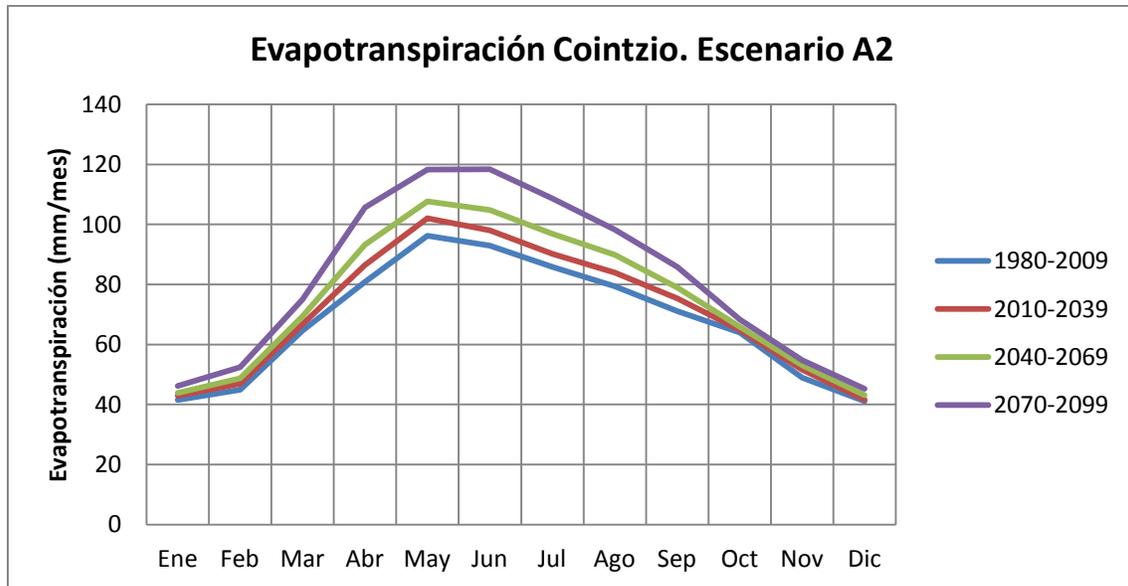


Figura C.2 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio mediante el escenario A2.

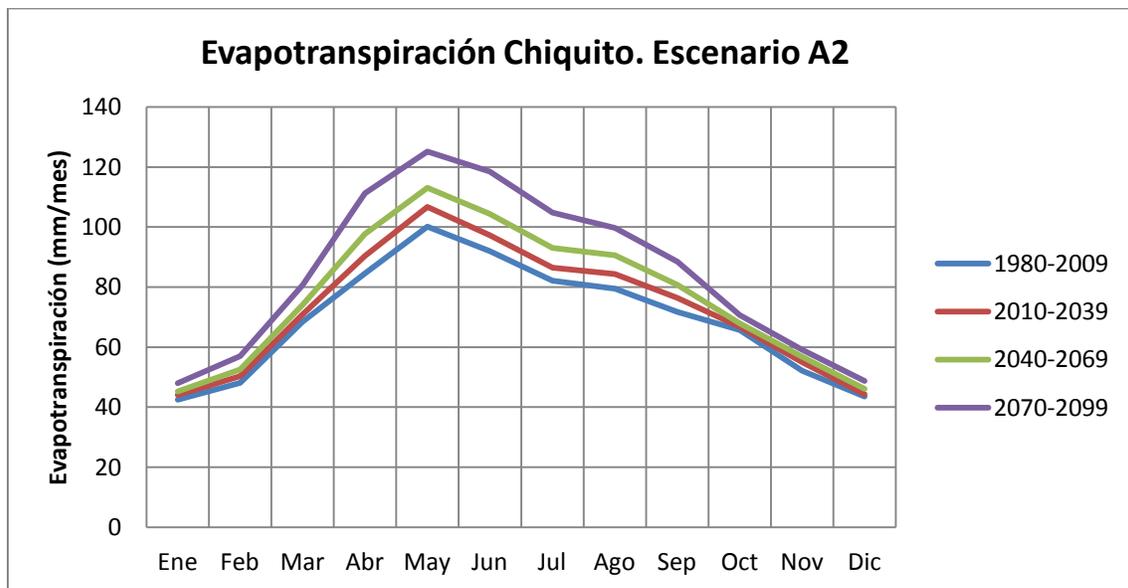


Figura C.3 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Chiquito mediante el escenario A2.

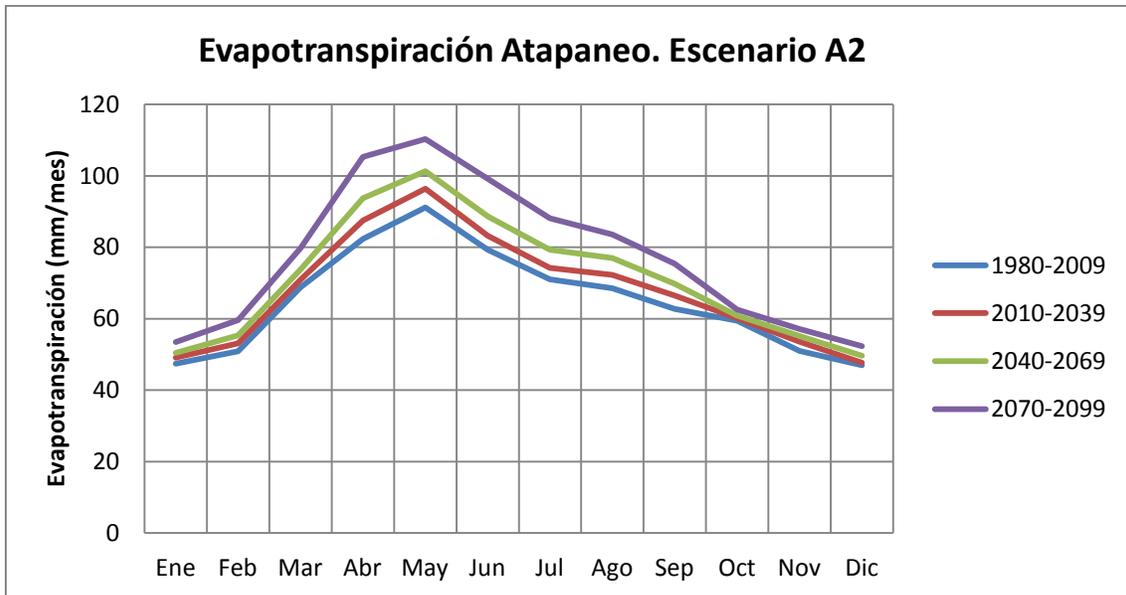


Figura C.4 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Atapaneo mediante el escenario A2.

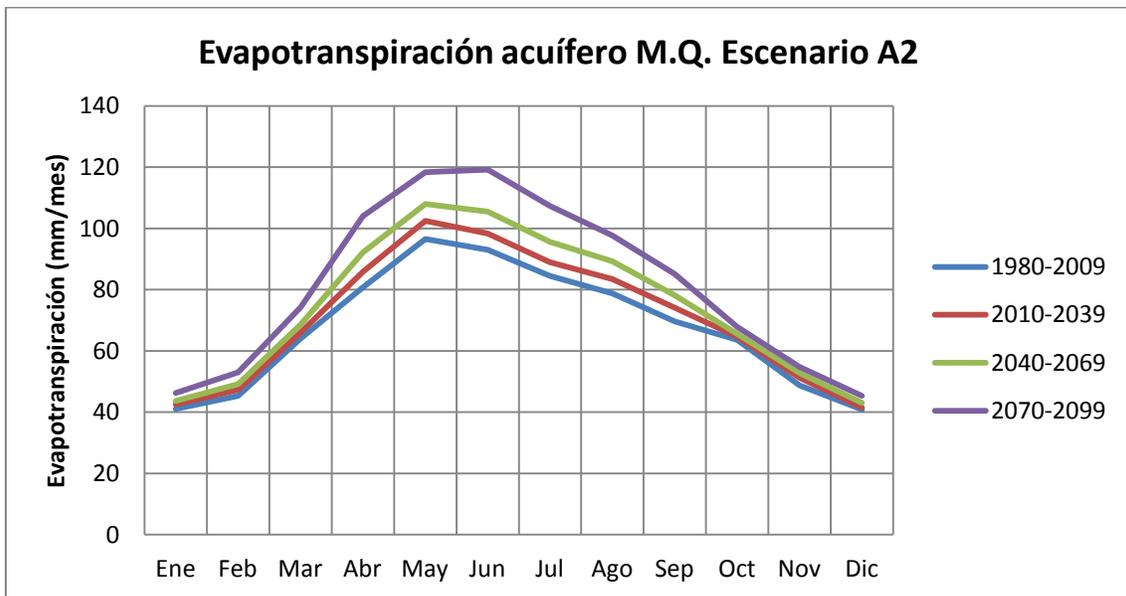


Figura C.5 Evapotranspiración mensual para el acuífero Morelia-Queréndaro mediante el escenario A2.

La evapotranspiración en el escenario A1B presente una variación en las evapotranspiraciones, es decir decrementándose e incrementándose para la segunda mitad de los últimos meses cálidos. Los incrementos son menores que los escenarios, más sin embargo se tiene una dispersión mayor que el escenario A2, los incrementos máximos se dan en la subcuenca Cointzio con posibles incrementos de hasta 3.97% para los años 2010-2039, 8.64% para los años 2040-2069 y 13.462% para los años 2070-2099. Debido a que la evapotranspiración es similar a la actual en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre hace que los escurrimientos sean similares en estos



meses. En las figuras C.6 a C.8 se observen los cambios mensuales en la evapotranspiración de las diferentes zonas de estudio.

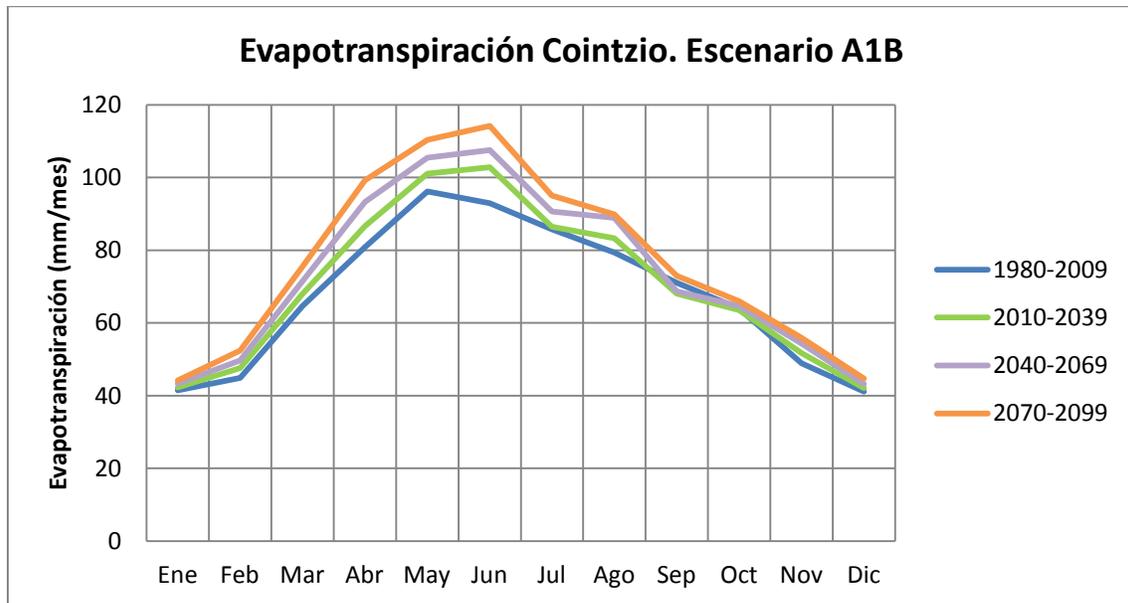


Figura C.6 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio mediante el escenario A1B.

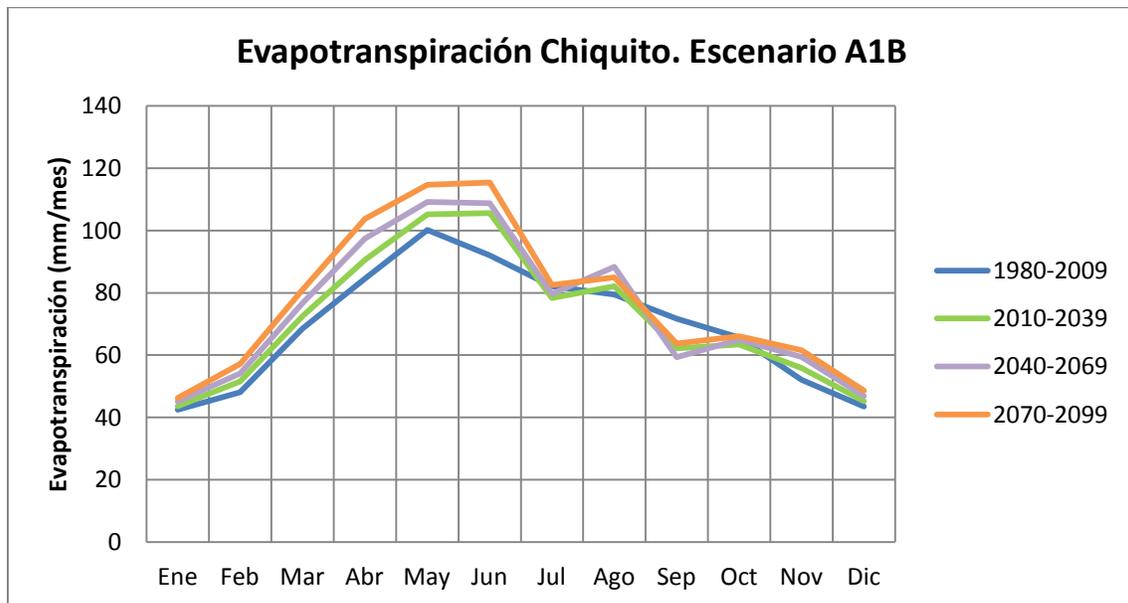


Figura C.7 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Chiquito mediante el escenario A1B.

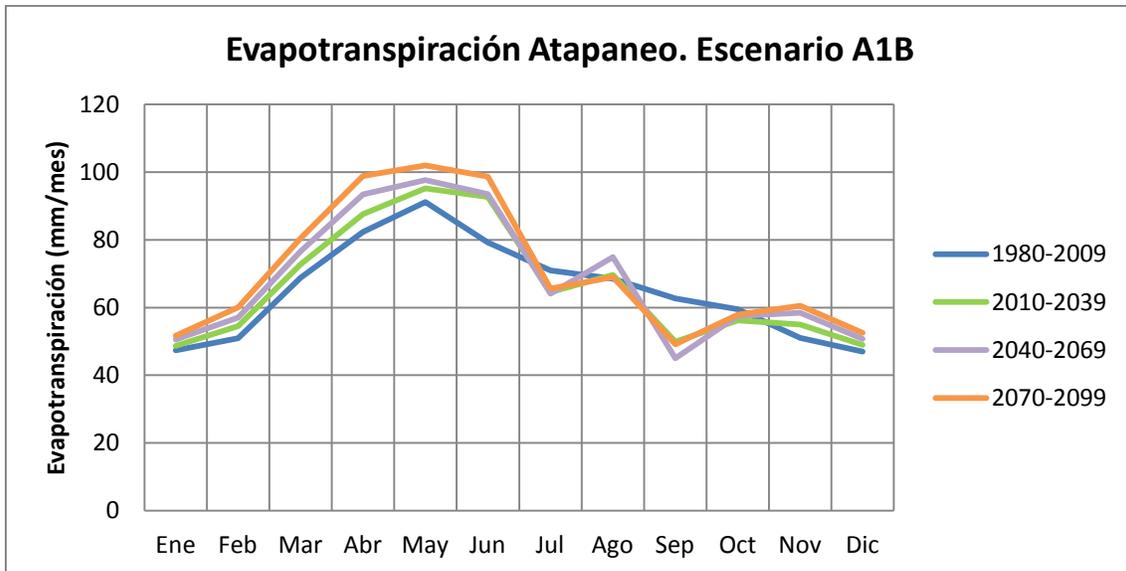


Figura C.8 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Atapaneo mediante el escenario A1B.

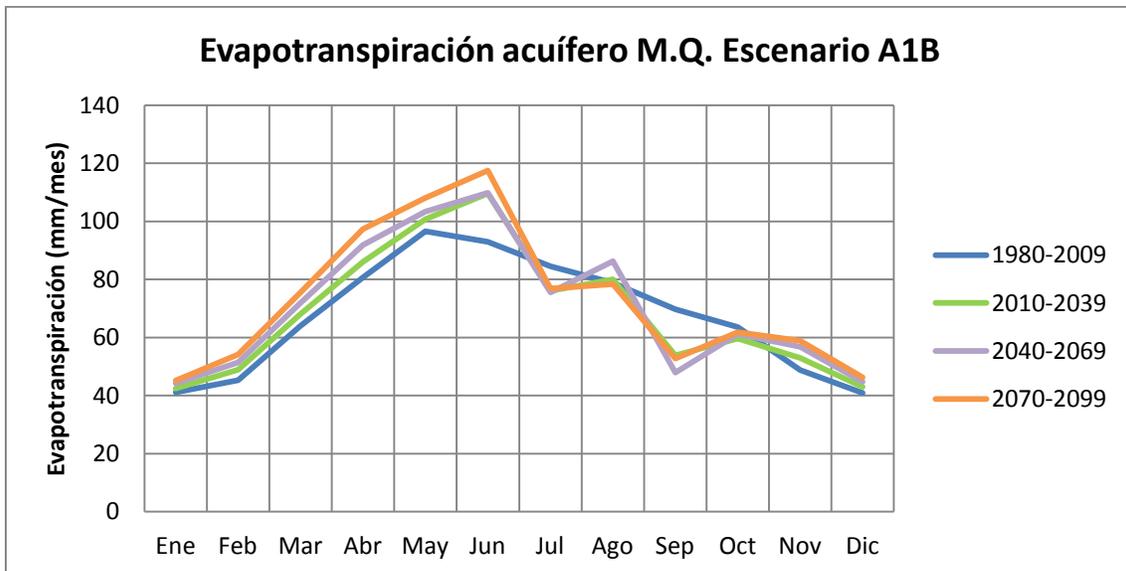


Figura C.9 Evapotranspiración mensual para el acuífero Morelia-Queréndaro mediante el escenario A1B.

El escenario B1 es el más optimista de los escenarios analizados en el presente estudio, a pesar de que para los años 2010-2039 presenta incrementos similares al escenario A2, el presente escenario, para las siguientes dos terceras partes del siglo sus incrementos son más lentos, estos alcanzando máximos cambios de 4.8% para los años 2010-2039, 8.18% para los años 2040-2069 y 11.29% para los años 2070-2099. En este último tercio de siglo la evapotranspiración es claramente menor que en los otros dos escenarios debido a la recuperación de la precipitación, y a que la temperatura incrementa de una manera más lenta que en los otros dos casos.

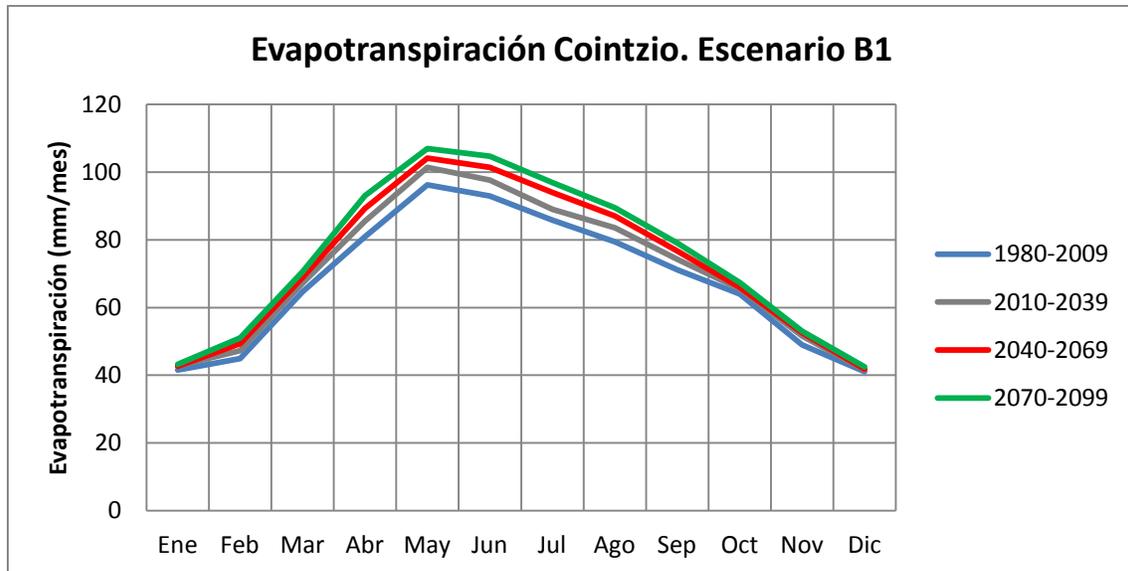


Figura C.10 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Cointzio mediante el escenario B1.

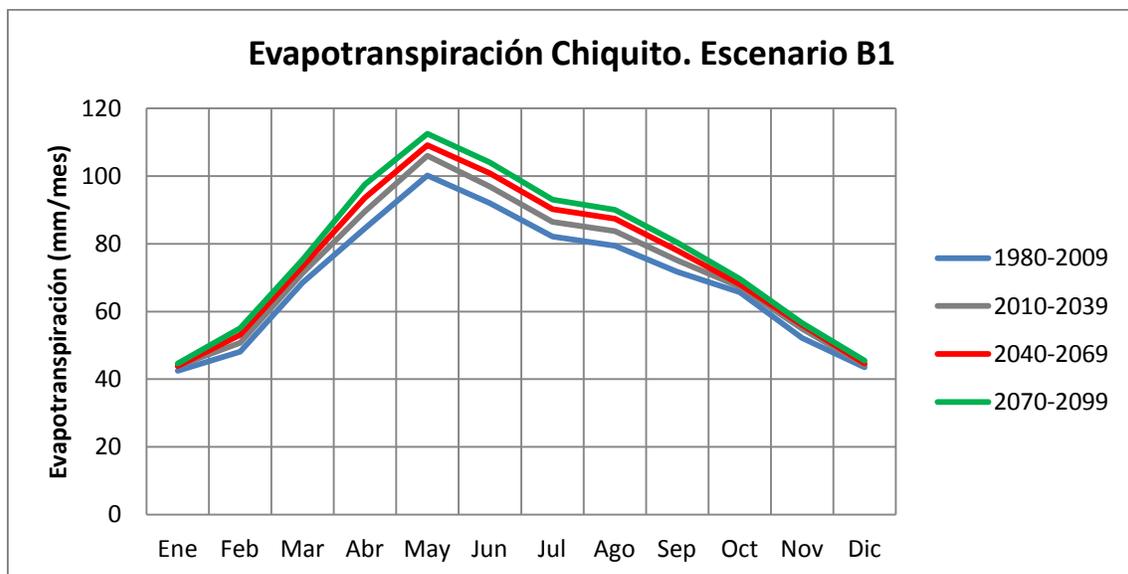


Figura C.11 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Chiquito mediante el escenario B1.

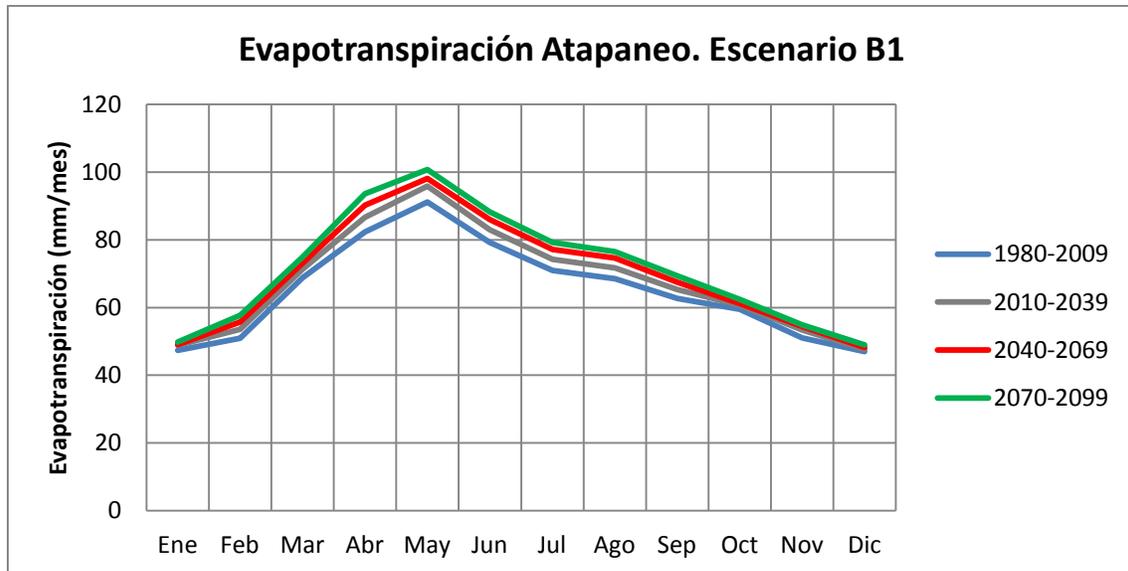


Figura C.12 Evapotranspiración mensual para la subcuenca Atapaneo mediante el escenario B1.

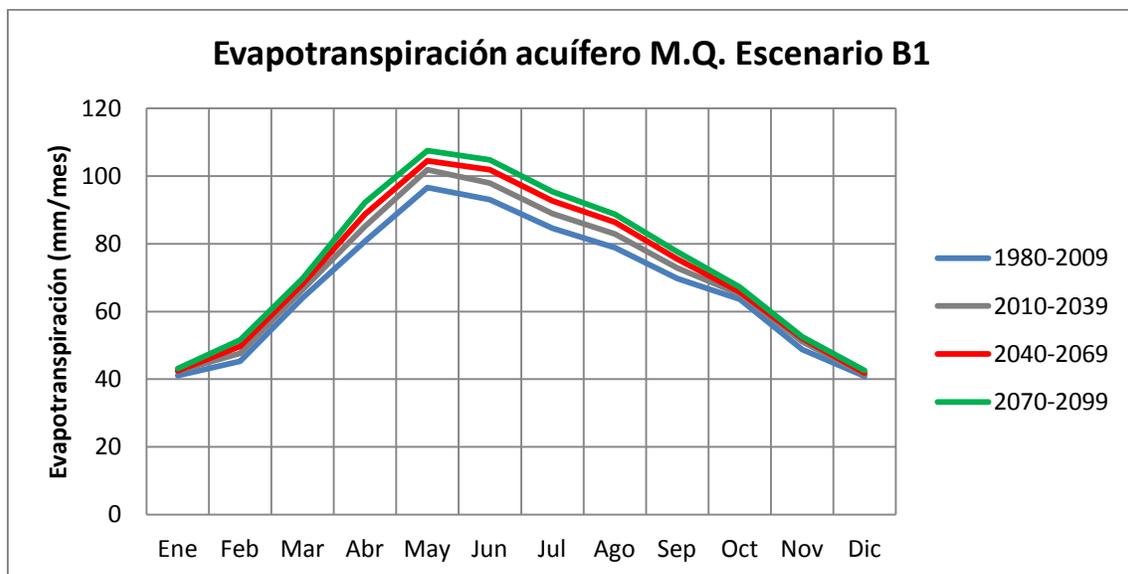


Figura C.13 Evapotranspiración mensual para el acuífero Morelia-Queréndaro mediante el escenario B1.