



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CUERPO ACADÉMICO GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

**“MEDIDAS DE MITIGACIÓN AL EFECTO DE CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA DEMANDA URBANA DE LA CUENCA DEL
RIO GRANDE DE MORELIA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**PRESENTA:
JUAN ENRIQUE LOYA VILLAGÓMEZ**

TESIS FINANCIADA POR:

ASESOR:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE
Dra. Ingeniería de caminos, canales y puertos



Morelia, Michoacán, Octubre del 2013.

DEDICATORIA

A Dios por darme las oportunidades que he tenido, así como todas sus bendiciones.

A mis padres, por darme la vida y enseñarme a vivirla.

A mi Mamá Elisa, gracias por enseñarme a luchar por mis sueños y demostrarme que al final todo esfuerzo da resultados, gracias por ser mi ejemplo, mi ídolo, mi todo; pero más que nada, gracias por confiar en mí y apoyarme en cada momento de mi vida.

A mi Papá Manuel, usted me ha acompañado hasta el fin del mundo para perseguir mis metas, ha llorado conmigo los fracasos y ha festejado a mi lado las victorias; a usted le debo todo lo que soy, es mi motivación y mi fortaleza, gracias por guiarme siempre.

A mis hermanas Mayarí y Yuritzi, sé que hemos pasado días difíciles; aun así ¡las adoro! Son mi alegría y aunque soy el único hombre, ustedes son mis hermanitas. Alexei, mi más grande amigo. Sólo quiero que sepan que su hermano desea su felicidad y estará a su lado apoyándolas eternamente. Gracias por hacer mi vida más divertida.

A toda mi familia, por todos los momentos maravillosos, por regalarme tantos recuerdos, tantas enseñanzas, por seguir mis pasos.

A mis abuelos, por darme a unos padres extraordinarios.

Los amo:

Juan Enrique Loya Villagómez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por el apoyo incondicional.

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.

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán por la beca otorgada para la realización del presente trabajo.

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

A todos mis compañeros de la sección 03 y amigos que me han animado para finalizar mis estudios y concluirlos de manera exitosa.

A todos los amigos que encontré en este largo viaje, por sus enseñanzas, experiencias y locuras; a los que están cerca y a los que viven a kilómetros.

A todos los profesores que regalan su experiencia en el aula de clases y nos hacen ser mejores ingenieros.

A mis compañeros del Grupo Gestión Integral del Agua, gracias por todas las horas de trabajo, por su apoyo en la investigación, por sus ocurrencias y su compañía durante muchas horas de investigación y diversión.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	ANTECEDENTES	12
2.1	Cambio Climático	12
2.2	Sistema de gestión de recursos hídricos AQUATOOL/SIMGES.	16
2.3	Escenarios Climáticos	18
3	DEMANDA URBANA DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE	22
3.1	Historia del abastecimiento de agua en la ciudad de Morelia.....	22
3.1.1	La Dotación de Agua.....	23
3.1.2	Los Conflictos por el Control de Agua.	24
3.1.3	La Baja Calidad del Agua y las Obras Implementadas.	24
3.1.4	La desecación de Ciénagas y las obras del río Grande.	25
3.1.5	Reflexiones Finales.	25
3.2	Fuentes de abastecimiento.	26
3.2.1	Ciclo Hidrológico del Agua.....	26
3.2.2	Diferentes Fuentes de Abastecimiento.	26
3.2.3	Situación del Agua en el Mundo y México.	27
3.2.4	Calidad del agua en México.....	28
3.2.5	Fuentes de Abastecimiento de la Ciudad de Morelia.	30
3.3	Demandas.....	34
3.3.1	Antecedentes.	34
3.3.2	Conservación del Agua.	35
3.3.3	Ventajas de las Políticas del Agua.	35
3.3.4	Conservación del Agua en el Abastecimiento y Consumo.	36
3.3.5	Consumo.....	36
3.3.5.1	Consumo Doméstico.	37
3.3.5.2	Consumo no Doméstico.	37
3.3.6	Demandas.....	37
3.3.7	Dotación.	39
3.4	Procedimientos de Gestión.	40
3.5	Evolución de la Demanda Urbana.	41

4	MODELO DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA CUENCA	43
4.1	Importancia de los modelos de gestión.	43
4.2	Tipos de Modelos para un Sistema de Recursos Hídricos.....	43
4.2.1	Modelos Matemáticos.	44
4.2.2	Simulación y Optimización.	46
4.2.3	Simulación de Sistemas de Recursos Hidráulicos.....	46
4.2.3.1	Programa HecResSim	48
4.2.3.2	Programa RiverWare	48
4.2.3.3	Programa MODSIM.	49
4.2.3.4	Programa Aquatool.	50
4.2.3.5	Programa WRAP	51
4.2.3.6	Otros modelos.....	52
4.3	Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD).....	53
4.3.1	Introducción.	53
4.3.2	¿Qué es un SAD (Sistema de Apoyo a la Decisión)?	54
4.3.2.1	Objetivos del SAD	55
4.3.2.2	Componentes de un SAD.....	55
4.3.2.3	Características y capacidades del SAD	55
4.3.2.4	Metodología para el desarrollo del SAD	56
4.3.2.5	Planeamiento para la Implementación del SAD.....	58
4.3.2.6	Ventajas y desventajas de los SAD	58
4.3.3	Análisis de SAD	59
4.3.3.1	Sub-sistema de administración de datos	59
4.3.3.2	Sub-sistema de administración de modelos.	60
4.4	Sistema de Apoyo a la Decisión AQUATOOL.....	61
4.4.1	Módulos de AQUATOOLDMA.....	62
4.4.2	Otros programas auxiliares de AQUATOOLDMA	65
4.5	Reglas de operación para un Sistema de Recursos Hídricos (SRH)	66
4.5.1	Reglas de operación genéricas	67
4.5.2	Concepto de gestión de un Sistema de Recursos Hídricos	71
4.5.3	Reglas de Operación Deterministas	73
4.5.4	Incertidumbres en las Reglas de Operación.....	75

5	ESCENARIOS CLIMÁTICOS	77
5.1	Modelos de circulación general de la atmosfera	77
5.1.1	Modelos Regionales del Cambio Climático	80
5.1.2	Principales MCGAO-A Modelos generales de circulación.	81
5.1.3	Evolución de los modelos de simulación del clima	82
5.2	Definición de Escenario climático.	84
5.3	Tipos de escenarios para estudios de cambio climático.	84
5.4	Escenarios de cambio climático para México mediante modelos regionales de clima. ...	92
5.4.1	Escenarios mediante el modelo regional de clima CPT.....	93
5.4.2	Escenarios Ensamble para México.	94
5.4.3	Escenario ensamble para Michoacán.....	95
6	GESTIÓN DE LA CUENCA CON CAMBIO CLIMÁTICO.	96
6.1	Datos históricos de la Ciudad.	96
6.1.1	Demografía de la ciudad de Morelia	97
6.1.2	Localización de la ciudad de Morelia	98
6.2	Cuenca del río grande de Morelia	98
6.3	Acuífero Morelia-Queréndaro.....	100
6.3.1	Fisiografía	103
6.3.2	Geomorfología	103
6.3.3	Geología	104
6.3.4	Hidrología	105
6.4	Infraestructura hidráulica.....	106
6.5	Demanda urbana de Morelia	107
6.5.1	Análisis y proyección de la Demanda Urbana.	107
6.5.1.1	Método aritmético	107
6.5.1.2	Método geométrico	109
6.5.1.3	Método mínimo cuadrado	110
6.5.1.4	Método de la curva exponencial	111
6.5.2	Infraestructura.	115
6.5.3	Problemática de Operación Actual y Futuro.	116
6.5.4	Propuestas para la Mejora del Suministro.	117
7	Escenario de mitigación al cambio climático.....	119

7.1	Modelo de Gestión de la Cuenca Existente.	119
7.1.1	Descripción del Esquema de Simulación.....	119
7.1.2	Desventajas del Esquema de Simulación Respecto a la Demanda Urbana.	123
7.2	Modificaciones del Modelo Existente.....	124
7.3	Simulación de la gestión para los escenarios de cambio climático.....	126
7.3.1	Esquema de simulación de los escenarios propuestos.	128
8	Resultados en la demanda urbana para los diferentes escenarios climáticos.....	135
8.1	Análisis de resultados de la demanda urbana con diferentes criterios de garantías.	135
8.1.1	Análisis de resultados evaluados por el criterio de garantía volumétrica.	137
8.1.2	Análisis de resultados evaluados por el criterio de planes hidrológicos.....	145
8.1.3	Análisis de resultados evaluados por el criterio UTAH DWR.	149
9	Conclusiones y recomendaciones.....	155
9.1	Problemas en la demanda urbana	155
9.2	Recomendaciones	156
10	Bibliografía.....	158

1 INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido de más importancia para la supervivencia del ser humano en el planeta Tierra, ya que la empleamos para satisfacer nuestras necesidades, como por ejemplo el uso para riego, generación de energía eléctrica, actividades industriales y la de más relevancia que es el uso para consumo humano. Pero este recurso ha ido escaseando y lo poco que queda es difícil obtenerla, por lo cual es trascendental optimizar su uso.

El ciclo hidrológico natural (Fig. 1.1) ha sido, históricamente y recientemente, fuertemente modificado debido a las extracciones y retornos de agua que se producen en el sistema para los usos urbanos, industriales, agrícolas e hidroeléctricos. Estas modificaciones del ciclo hidrológico afectan de una forma importante a los flujos de agua que se producen en la cuenca hidrográfica, aumentando o reduciendo los volúmenes de agua existentes en los acuíferos, las relaciones río-acuífero, las transferencias laterales y las salidas al mar.

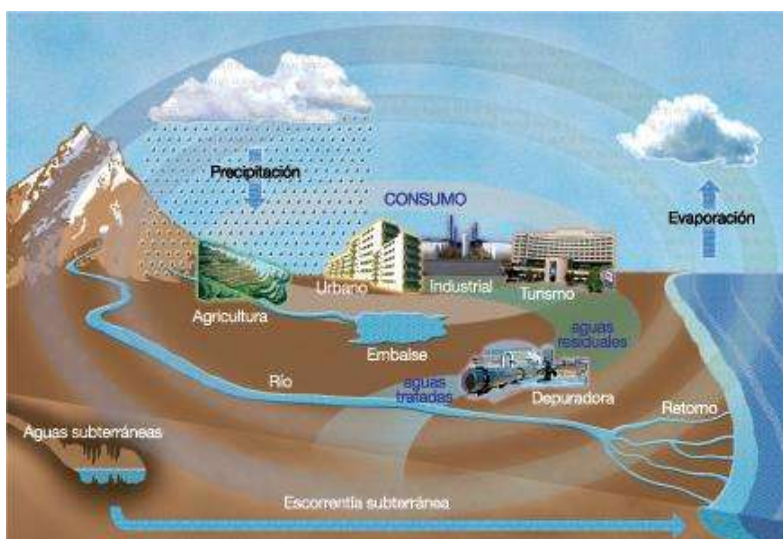


Fig. 1.1 Ciclo integral del agua.

Las modificaciones del subsistema superficial son relativamente fáciles de analizar, mediante la restitución a régimen natural o mediante el empleo de modelos de simulación que reproduzcan la gestión de los embalses y las derivaciones realizadas a través de conducciones. Sin embargo, las modificaciones que se producen en el subsistema subterráneo y su influencia en el resto de componentes del sistema, y especialmente en el subsistema superficial, son más complejas de analizar y de evaluar de forma integrada. El ciclo hidrológico actual difiere del natural, y por lo tanto, el transporte de sustancias químicas que en él se produce es diferente al que se produciría en régimen natural. Por estos motivos, es necesario contemplar las modificaciones existentes en el régimen natural lo más fielmente posible tanto para el análisis cuantitativo de los flujos del agua, como para el análisis fisicoquímico del agua.

Mediante el modelo de simulación desarrollado se ha realizado la simulación del ciclo hidrológico en régimen alterado, introduciendo las afecciones antrópicas que provocan las actividades humanas en el subsistema subterráneo. Esta simulación permitirá conocer el grado de afección actual del ciclo hidrológico respecto a la situación en régimen natural obtenida anteriormente, tanto desde el punto de vista del comportamiento de los acuíferos, como de los caudales circulantes en los tramos de río, así como las transferencias laterales y las salidas al mar de los acuíferos. En esta etapa de la modelación es necesario tomar en cuenta las extracciones subterráneas agrícolas, urbanas e industriales y su distribución espacial.

Actualmente, la carencia de disponibilidad de agua en cantidad y/o calidad suficientes resulta uno de los problemas más graves para el desarrollo de México. Con el Cambio Climático, el problema se agudizará.

Pero recientemente el cambio climático es considerado un tema fundamental entre grupos y organizaciones gubernamentales a nivel internacional.

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.

Para intentar comprender la problemática de los efectos del cambio climático, conviene diferenciar los conceptos siguientes:

- Clima: es el conjunto de condiciones atmosféricas que definen a una región, el cual está representado por el estado del tiempo (incluyendo las variables superficiales de temperatura, precipitación o viento).
- Cambio Climático: se refiere a todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo, consecuencia de variabilidad de los ciclos naturales y de las actividades del hombre.
- Calentamiento Global: es la manifestación más clara del cambio climático referente del aumento promedio de las temperaturas tanto terrestres como marinas mundiales.

El Cambio Climático se atribuye esencialmente al elevado índice de la emisión y concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ocasionados por el uso de combustibles fósiles empleados de manera exhaustiva en las actividades humanas (carbón, petróleo, gasolinas, gas natural y los combustibles derivados del petróleo), así como también la tala inmoderada, los incendios forestales y contaminación del agua y suelo. Sin embargo, igualmente los procesos naturales afectan a menor escala, siendo también fuentes de contaminación atmosférica.

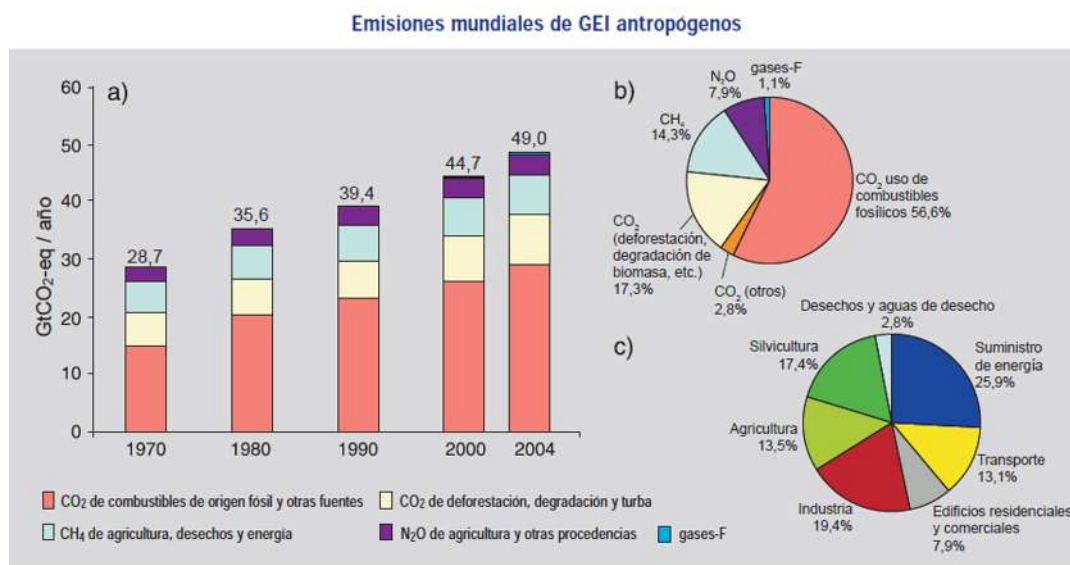


Fig. 1.2 a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO₂ equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO₂ equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación).

Como secuela de las variaciones en las temperaturas y las precipitaciones se espera el incremento de la presión sobre los recursos hídricos, con un amplio horizonte de consecuencias para los seres humanos y el medio ambiente en general, esto al presentarse modificaciones en el ciclo del agua, la humedad del suelo, el escurrimiento, la evaporación, la recarga a los acuíferos, entre otros. Pero las consecuencias más extremas se traducirán en un exceso de precipitaciones en algunas zonas, frecuentemente en periodos muy cortos (originando inundaciones), y en otras regiones con periodos de escasez prolongadas (originando sequías).

Finalmente todos estos cambios pueden ocasionar que la infraestructura hidráulica actual pueda mostrarse inadecuada e ineficiente si las condiciones climáticas se alteran. 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 determinen los probables efectos del cambio climático en los recursos hídricos y así contar con herramientas que ayuden a proyectar, gestionar y, en nuestro caso, mitigar los efectos que tendrían los cambios climáticos en los recursos hídricos de la cuenca del río Grande de Morelia.

En esta porción del estado se localiza el mayor número de obras de almacenamiento, entre las que sobresalen: la de Cointzio sobre el río Grande de Morelia, que tiene una capacidad total de 84'800,000 m³ y es usada para abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia.

Los almacenamientos de esta región son aprovechados también en la generación de energía eléctrica, por lo que esta porción tiene una gran importancia dentro del marco económico del estado (INEGI, 2007).

El uso principal del agua es agrícola (53.69%), el segundo lugar lo ocupa el público urbano (40.21%) y en menor medida los demás usos (6.1%); para este análisis se utilizaron los pozos activos.

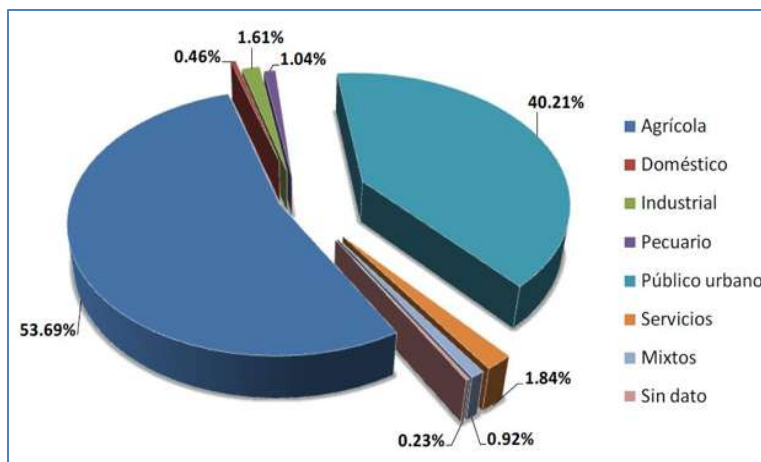


Fig. 1.3 usos del agua de la cuenca del río Grande de Morelia. CNA,2007.

El efecto del Cambio Climático a nivel de usos urbanos en una cuenca desarrollada no es posible deducirlo en función del efecto del Cambio Climático en las precipitaciones y temperaturas, ya que en una cuenca desarrollada intervienen diversos recursos: superficial o subterráneo, así como diversos usos.

Para la cuenca del río Grande de Morelia la disponibilidad de agua potable por el momento es satisfactoria, pero se prevé una disminución en los gastos, así como también una mayor demanda urbana y agrícola, lo cual creará déficit en el suministro a las demandas de la cuenca.

Los centros urbanos generan presión a la cuenca del río Grande porque en ocasiones tienen descargas de aguas negras en afluentes, las industrias de la zona que también vierten desechos en aguas superficiales, entre otras, que llegan a afectar la calidad del agua de la zona tanto superficial como subterránea.

La ciudad de Morelia representa el mayor centro urbano dentro de la zona en estudio, con algunos otros distribuidas en menor proporción por toda el área, sin embargo, es necesario tener ubicado el municipio de Morelia, pues puede llegar a afectar las aguas superficiales y subterráneas por las razones del párrafo anterior.

La cuenca del río Grande de Morelia cuenta con varias fuentes de abastecimiento entre subterráneas y superficiales para satisfacer la demanda urbana de sus habitantes, pero estas fuentes no serán suficientes para abastecer a toda su población, principalmente la ciudad de Morelia, debido a que hay una distribución diferencial de agua en las colonias

de la ciudad, en algunas colonias no se les suministra agua todos los días mientras que otras son abastecidas todos los días y de mejor calidad.

En la actualidad contamos con tecnología que con ayuda de la computación los encargados de tomar decisiones pueden hacer uso de nuevas herramientas (Software) para evaluar diferentes alternativas y con esto dar soluciones más eficaces a la problemática del agua. A estas herramientas se les denomina Sistemas de Apoyo a la Decisión (por sus siglas en ingles SSD) y son un conjunto de herramientas eficaces, potentes y de gran amplitud, abiertas para uso de todos los organismos y/o personas interesadas o involucradas en la problemática de la gestión de recursos hídricos. Los SSD permiten que estas personas tomen decisiones eficientes debido a la amplia y rápida forma de generar escenarios de la misma situación en la cual se debe tomar una o varias decisiones.

El presente trabajo analiza las diferentes propuestas de mitigación para hacer frente al efecto de Cambio Climático en el uso urbano de la cuenca del río Grande de Morelia. Para ello, se implementa un esquema de simulación en el marco de sistemas de apoyo a la decisión para la Gestión de Cuencas (AQUATOOL), que permita evaluar las diferentes medidas de mitigación al efecto del cambio climático.

El objetivo de esta tesis es validar un modelo de simulación de la gestión de la cuenca del río Grande útil para la planeación del uso urbano requerido por la Ciudad de Morelia, así como recomendar la aplicación de algunas medidas de mitigación a la problemática de abastecimiento de agua que sufre Morelia.

2 ANTECEDENTES

2.1 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.

Los cambios en el clima ocurren por factores naturales, pero también por las acciones del ser humano. El cambio climático que estamos experimentando se asocia principalmente con aumentos de la temperatura global del planeta y alteraciones en el ciclo hidrológico (lluvia); se estima que este problema continuara y si no adoptamos medidas de mitigación el efecto del cambio climático se intensificara condicionando la vida en la Tierra.

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 algún parámetro meteorológico como la temperatura o la precipitación salgan del rango de valores medios de los que estamos acostumbrados, refiriéndonos a las anomalías climáticas originadas tanto por forzamientos internos, como inconsistencias en la atmósfera y en el océano; o por forzamientos externos, como lo podría ser alguna variación en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso las transformaciones que la actividad humana está propiciando al planeta. El clima puede variar de distintas maneras, por lo que hacer un pronóstico a largo plazo tiene sus complicaciones.

La Tierra absorbe radiación solar o de onda corta, principalmente en la capa superficial terrestre, y es redistribuida por circulaciones oceánicas y atmosféricas para tratar de balancear las variaciones térmicas. La energía recibida es re-enviada al espacio (radiación de onda larga) para intentar crear un balance entre energía recibida y disipada a largo plazo. Cualquier alteración de este balance se reflejara como cambios en el clima, también llamados forzamientos radiativos. Cuando estos forzamientos son positivos tienden a calentar la superficie terrestre, pero cuando son negativos se producirá un enfriamiento.

El aumento de la temperatura superficial del planeta en décadas recientes es atribuible a la contaminación atmosférica global que resulta del uso de combustibles fósiles en autos o fábricas. La deforestación también contribuye al calentamiento global, por los gases que resultan de las quemas.

Al aumentar la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el dióxido de carbono o el metano, aumenta la cantidad de energía atrapada en la atmósfera, con lo que cree que esto llevará a un calentamiento global más allá de las alteraciones climáticas normales. De mantenerse estas tendencias en las emisiones de contaminantes, el planeta se calentará de forma indefinida.

En 1988, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), al detectar el problema del cambio climático mundial decidieron crear el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC).

La función del IPCC consiste en analizar de forma exhaustiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos de riesgo que supone el cambio climático, sus posibles repercusiones y posibilidades de adaptación y atenuación del mismo.

En 1988 se estableció el Plantel 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”.

El calentamiento global, por su parte, es la manifestación más evidente del cambio climático y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales, así como cambios en la intensidad de las lluvias, inundaciones principalmente en zonas costeras a causa del derretimiento de glaciares y el incremento en el nivel medio del mar, además de la aparición de más eventos extremos como sequías o huracanes.

Para el futuro del Estado de Michoacán en cuestión de la gestión de los sistemas hídricos se encuentra en riesgo a consecuencia del Cambio Climático y sus secuelas han comenzado a repercutir de manera directa en los ecosistemas del Estado.

La temperatura promedio del planeta ha incrementado $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ en el último siglo por el efecto antrópico. Lo malo, es que se prevé que esta situación empeore día a día, debido a que no existe todavía una cultura de concientización que permita mitigar la contaminación atmosférica.

El impacto del efecto del cambio climático para Michoacán ha tenido consecuencias fatales. Por mencionar, en el 2001, las lluvias, los deslaves y desbordamientos de ríos y presas provocaron 95 muertes, 14,102 viviendas sufrieron los estragos afectando a 126,854 personas y cerca de 10,000 hectáreas de cultivo fueron perjudicadas. Pero en 2002 debido a las bajas temperaturas provocaron el deceso de 4 individuos. Y para el año 2005 se registró una fuerte sequía que ocasiono que se perdieran 14,723 hectáreas de cultivos con un costo total aproximado de 13.3 millones de pesos.

Para Michoacán, el efecto del cambio climático de mayor amenaza es el riesgo de inundación de las costas del Estado por un aumento en el nivel medio del mar, alrededor de 1.5mts.

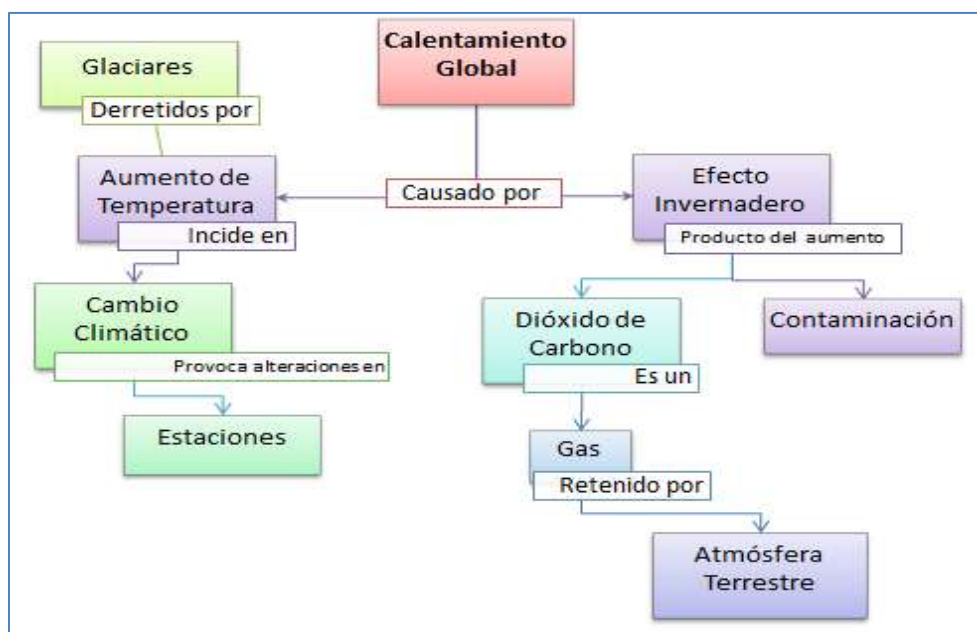


Fig. 2.1 Causas y efectos del calentamiento global.

La vulnerabilidad que el Estado de Michoacán espera para sus municipios es la siguiente:

- Centros Urbanos: Los cambios climáticos ocurrirán entorno a lo socioeconómico, a causa del exponencial crecimiento demográfico, procesos de industrialización poco eficientes, incremento de vehículos automotores e incremento de población con niveles de pobreza altos.
- Agua: El Estado se encontrara con presión media de 20 a 40% sobre este recurso para el año 2025.
- Vegetación: los tipos de vegetación más afectados son los que se encuentran expuestos a condiciones más secas y más cálidas.
- Sequías: Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión, y eso podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud.

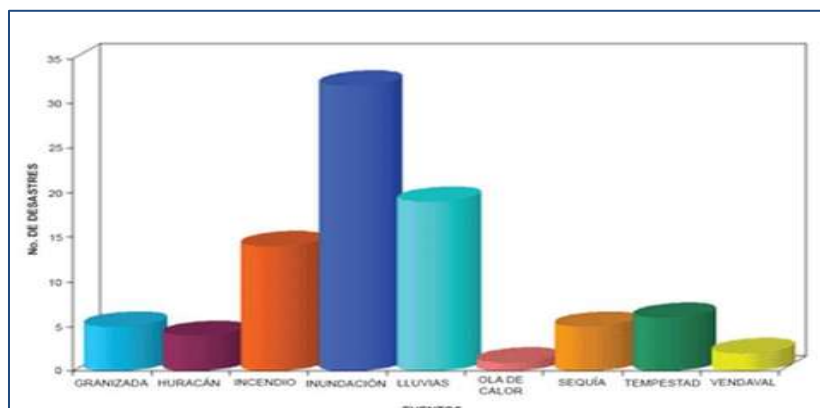


Fig. 2.2 Desastres hidrometeorológicos (1980-2001). Fuente INECC.

El aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea.

Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían seriamente la disponibilidad de agua para el consumo humano, para la agricultura y para la generación de energía.

Actualmente, la Comisión Nacional del Agua y la Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas del Estado de Michoacán han desarrollado la planeación hídrica regional y Estatal hasta el año 2030; considerando los efectos de las sequías e inundaciones y esperando una variación climática a consecuencia del calentamiento global.

Consideramos que es de vital importancia fundamentar el riesgo que corren los Sistemas Hídricos de la Cuenca del Río Grande de Morelia enfocándonos en algunos aspectos: “la mitigación y la adaptación al Cambio Climático”.

Por medio de la mitigación buscaremos establecer medidas que nos permitan en primera instancia contrarrestar o controlar los efectos del cambio climático para mitigar la problemática futura de agua potable para satisfacer la demanda urbana de la cuenca del río Grande de Morelia enfocándonos en la ciudad de Morelia, que es la ciudad que cuenta con mayor densidad de población, es decir, reducir el uso y optimizar recurso.

A través de la adaptación, se plantearan estrategias e implementaran acciones para reducir la vulnerabilidad del recurso hídrico frente al cambio climático, de forma tal que los impactos negativos esperados bajo cambio climático sean menores o eliminados, y si se pudiera, poder aprovechar las características que el nuevo clima llegue a presentar.

Finalmente, consideramos que la prevención es una estrategia fundamental para el desarrollo sustentable, dado que permite compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, dosificando y orientando la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa. Para aprovechar los recursos naturales en forma segura es necesario conocer la amenaza y la vulnerabilidad como elementos dinámicos es decir, en constante cambio.

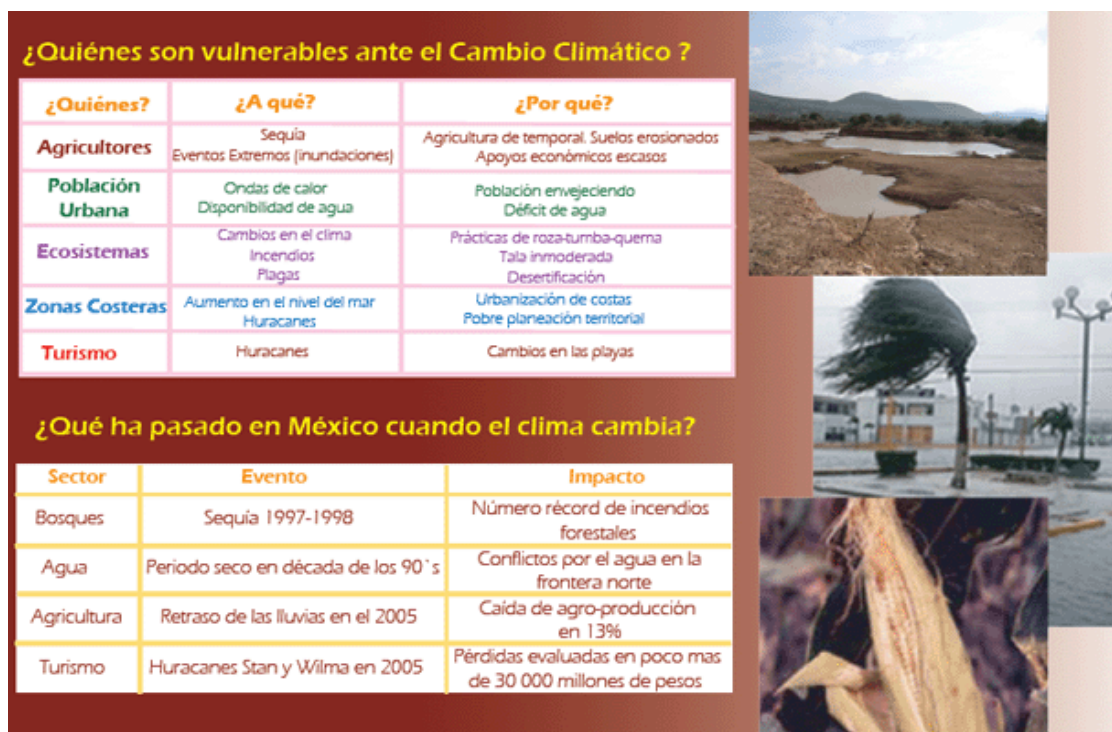


Fig. 2.3 Vulnerabilidad de México ante el Cambio Climático. Fuente INECC.

2.2 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.

Aquatoool (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).

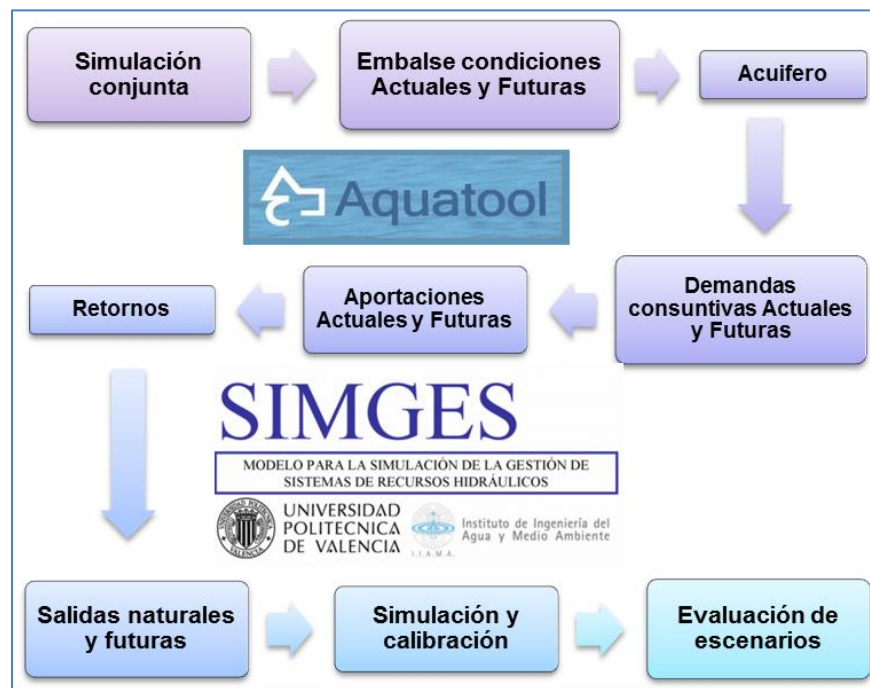


Fig. 2.4 Metodología para la gestión del sistema de recursos hídricos mediante el programa AQUATOOL/SIMGES.

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 (Fig. 2.4), 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.

2.3 Escenarios Climáticos

Debido a que el cambio climático es originado por la acción del hombre y sus efectos han tenido un crecimiento acelerado y catastrófico, así que 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).

El IPCC es el encargado de contemplar las emisiones de concentraciones de gases de efecto invernadero así como el desarrollo socioeconómico de cada región, para la creación de escenarios que muestren en cambio climático.

El Plantel intergubernamental de cambio climático (IPCC) 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”.

Para conocer más hay que definir que es 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.

Para realización de un escenario de emisiones para nuestro Estado, debemos suponer que los municipios de Michoacán compartirán variables como: crecimiento económico, crecimiento poblacional, velocidad del cambio tecnológico y la velocidad en que nuestro país alcanzará tecnológicamente a los países desarrollados. La mayoría de los escenarios son contruidos en base a la evolución de las tendencias climáticas pasadas.

Cuando estudiamos Escenarios Climáticos, usualmente tendemos a analizar los siguientes:

- Escenarios “A”: partimos de la premisa en que en el futuro las tendencias de producción de gases de efecto invernadero seguirán siendo como hasta ahora, es decir, se seguirá quemando petróleo y carbón hasta que las existencias prácticamente se agoten, el crecimiento poblacional continuara incrementándose rápidamente y los países más desarrollados cambiaran su uso de energía a fuentes alternas (solar, eólica, etc.) mucho más rápido que los países más desarrollados.
- Escenarios “B”: presuponen una importante disminución del consumo de combustibles fósiles, además comparten una disminución del crecimiento poblacional y un cambio tecnológico rápido en el que los países menos desarrollados alcanzaran relativamente rápido a los desarrollados.

De lo anterior, podemos mencionar 3 escenarios de emisiones importantes:

1. Escenario A2 “Pesimista”
2. Escenario A1B “Intermedio”
3. Escenario B1 “Optimista”

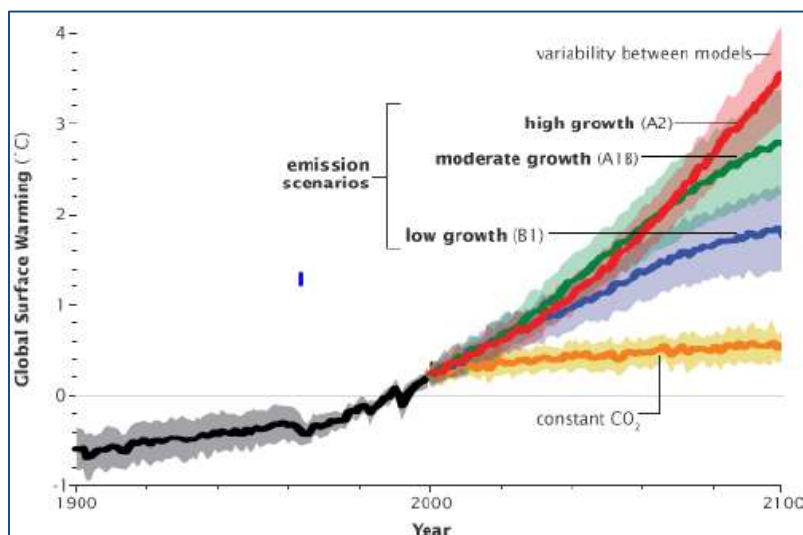


Fig. 2.5 Variación de temperatura para cada escenario climático. IPCC, 2007.

A continuación se describen algunas características de los Escenarios de Cambio Climático:

Tabla 2.1 Escenarios de cambio climático.

Escenarios de emisiones de GEI	Descripción
A2	Describe un mundo heterogéneo, el tema principal es la dependencia y la preservación de las identidades locales
A1B	Rápido Crecimiento Convergente. Balance entre los combustibles fósiles y otras fuentes de energía.
B1	Describen a futuro un mundo convergente con un énfasis ambiental global, la población global alcanza su máximo a mediados del siglo XXI y declina posteriormente.
Histórico	Los datos históricos (1970-1999) son generados por el Ensamble de los MCG.
COMMITTED	Escenario de compromisos de reducción de emisiones, en el que se mantienen constantes las concentraciones globales de GEI en la atmósfera a un nivel similar al del año 2000.

Los escenarios de emisiones parten de cuatro diferentes historias de desarrollo socioeconómico global, denominadas A1, A2, B1 y B2, que describen consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero. Todos los escenarios basados en una misma historia constituyen una “familia”.

La historia A1 y su familia de escenarios describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido, una población mundial que llega a su máximo a mediados del siglo XXI y declina después, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1, se desarrolla en tres grupos con direcciones alternativas en cambio tecnológico y sistema de energía.

Los tres grupos A1 se distinguen por énfasis tecnológico:

- a) Uso intensivo de combustibles fósiles (A1F1),
- b) Fuentes de energía no fósiles (A1T),
- c) Balance entre todas las fuentes de energía (A1B).

La historia A2 y su familia de escenarios, describen un mundo muy heterogéneo. Patrones de fertilidad sobre regiones convergen muy lentamente, lo que resulta en un continuo aumento de población. El desarrollo económico está primeramente orientado en forma regional, con crecimiento económico per cápita y cambios tecnológicos fragmentados y más lentos que en las otras historias.

La historia B1 y su familia de escenarios, describen un mundo convergente con población mundial que llega a su máximo a mediados del siglo XXI y luego decrece como en la historia A1, pero con un cambio rápido en la estructura económica hacia una de servicios y economía de la información, con reducciones en la intensidad del material y la introducción de tecnologías limpias y uso eficiente de recursos. Le da énfasis a soluciones globales de la economía, sustentabilidad ambiental y social, incluyendo equidad, pero sin iniciativas climáticas adicionales.

La historia B2 y su familia de escenarios, describen un mundo el cual tiene énfasis en soluciones económicas locales y sustentabilidad social y ambiental. Es un mundo con incrementos constantes en la población, a una razón menor al de la historia A2, niveles de desarrollo económico intermedio y menos rápido, así como más diversos cambios tecnológicos con respecto de las historias A1 y B1. Esta familia de escenarios está orientada hacia la protección ambiental y equidad social, enfocándose en niveles locales y regionales.

Un escenario adicional que cabe mencionar es el COMMIT y que corresponde al escenario idealizado si todos los países cumplieran las cuotas de emisiones de GEI bajo el protocolo de Kioto. El escenario COMMIT es el escenario que supone menor concentración futura de GEI y es una idealización de lo que sucedería si todas las naciones se comprometieran con el medio ambiente.

El escenario con el que más proyecciones regionalizadas se han construido a través de CPT “Climate Predictability Tool” es SRES “Special Report on Emissions Scenarios” A1B con 18 modelos y aproximadamente 90 realizaciones; SRES A2 tiene 14 modelos con alrededor de 70 realizaciones; SRESB1 con 15 modelos y aproximadamente 70 realizaciones, y el escenario COMMIT con 12 modelos y aproximadamente 50 realizaciones. Tener una muestra suficientemente grande es un elemento fundamental en

la construcción probabilista de proyecciones del clima futuro. Para formar el Ensemble se puede tomar la mediana y una medida de dispersión entre los miembros. Usando la mediana se asegura que el Ensemble no tiene sesgos estadísticos y corresponde al valor más probable.

La secuencia para la obtención de escenarios climáticos de los MCGAO-A (Modelos de Circulación General Acoplados Océano Atmósfera).

3 DEMANDA URBANA DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE

3.1 Historia del abastecimiento de agua en la ciudad de Morelia

Los primeros habitantes de la ciudad de Valladolid (hoy Morelia) tuvieron que recurrir directamente al río Chiquito para abastecerse de agua y poco después construyeron algunas obras hidráulicas para conducirla hasta la ciudad. En 1549 se construyó la primer obra hidráulica llamada acueducto Vallisotelano, con estructura levantada por horcones o terraplenes en los que se apoyaban las “canoas” de madera (troncos grandes y largos, tallados en el centro en forma de canoa alargada, de ahí el nombre) unidas por clavos o cuñas de tejamanil, para que el líquido llegara a la ciudad desde la zona Oriente de la ciudad. , pero esta solución no fue la más adecuada por su rudimentaria construcción, así que los españoles tuvieron que modificar la estructura con cal y cantos. Esta obra tuvo problemas constantes debido a las continuas fallas técnico-constructivas.

En el siglo XVI se realizaron solicitudes al Virrey para que ayudara a resolver la problemática en el suministro de agua potable en la ciudad. En 1590 se estableció un impuesto a los vendedores de vino (SISA), destinado para la construcción y rehabilitación de la red de agua o acueducto. El Ayuntamiento de Valladolid fue el encargado de realizar estas obras, tal Ayuntamiento era institución política dependiente de la Corona Española y muy ligada a los intereses de los grupos del poder local que se interesaron más por su beneficio individual que por el colectivo. De manera paralela a la construcción del acueducto se introdujo la red de distribución de agua en la ciudad, la cual pasaba a través de canales y estaba integrada por tomas individuales para las viviendas, huertas, conventos y edificios públicos, así como tomas públicas para el resto de la población. Había una distribución diferencial de agua en la ciudad, mientras que un sector privilegiado de la población tenía asegurada la dotación y abastecimiento de agua, mientras otro sector mayoritario tenía que caminar largas distancias y hacer filas en las pilas públicas para captar pequeños volúmenes de agua. Los que tenían tomas particulares eran poseedores de mercedes de agua que les habían sido otorgadas por el Ayuntamiento y la Corona, a los cuales les aseguraba el control del agua e impedía que fuera aprovechada por el resto de la población. Los que recurrían a tomas públicas no tenían derecho a poseer dichos privilegios, ya que estaban destinadas para los grupos de poder local.

No obstante, este grupo de poder era el principal beneficiado con las obras de agua en la ciudad y su aportación económica para financiarlas era mínima. Situación que contrastaba con la aportación de trabajo y especie que hacían los pueblos aledaños a la ciudad y un amplio sector de la población indígena y mestiza que en ella habitaba. Las obras de agua se interrumpieron y fue hasta 1677 que se destinó recurso por parte del Virrey en turno para rehabilitar el acueducto. Esto mejoró el abastecimiento de agua por un par de años más. Sin embargo, la demanda aumento, ya que para 1681 la ciudad tenía una población de 2000 habitantes de los cuales 800 eran españoles y 1200 pertenecían a las diferentes castas.

En 1705 fue destinado recurso económico para realizar un ambicioso proyecto de abastecimiento de agua en la ciudad, que incluía la construcción de un acueducto de cantera y una red de distribución de agua en forma subterránea a través de tuberías de barro. Con ello, el Clero logró desplazar al Ayuntamiento en la gestión de las obras de agua, su fuerza y poder en lo económico y político influyo en la vida social de la ciudad. Los problemas técnico-constructivos estuvieron presentes a lo largo de la construcción del acueducto y red de distribución de agua, ya que fue necesario reconstruir algunos tramos y darles mantenimiento constante. Para 1731, las obras lograron concluirse: casi tres décadas después de que fueron iniciadas.

Para 1785 las condiciones del acueducto eran tan pésimas que requerían de una reparación urgente. Varios de sus arcos se derrumbaron. Ello generó numerosos problemas e interrupciones en el suministro de agua para la población.

Fray Antonio de San Miguel fue el responsables de rehabilitación del acueducto y buscó a través de diferentes medios, la liquidez necesaria para emprender los trabajos de reconstrucción, puesto que para él la rehabilitación del acueducto tenía dos propósitos los cuales eran; el suministro de agua en la ciudad y el proporcionar empleo a las personas de la localidad. Se reconstruyeron completamente algunos arcos y se añadieron contrafuertes en tramos que lo requerían. Las obras se construyeron cuatro años después y beneficiaron a más de 17,000 habitantes.

El acueducto se conforma por 253 arcos de medio punto que alcanzan su máxima altura de 9.24 metros, cercano a la zona del Jardín Villalongín. Posé 2 cajas de agua, una al inicio, y la otra aproximadamente a 700 metros de la primera. La longitud que tiene es de más de 1,700 metros.

Este acueducto siguió proporcionando el servicio a la ciudad hasta el año de 1910, ya que fue reemplazado por un nuevo sistema de distribución del agua. Convirtiéndose así en un símbolo importante para todos los morelianos.

3.1.1 La Dotación de Agua.

El Ayuntamiento desempeñó una labor muy importante ya que era el encargado del mantenimiento de las obras de captación, conducción y distribución del agua, así como de la ampliación de su cobertura en diferentes puntos de la ciudad. Por ejemplo, en 1857 y 1890, el Ayuntamiento construyó 12 pilas públicas, y rehabilitó varios tramos de red de distribución y reconstruyó tramos del acueducto y del encortinado de la presa del Rincón. El financiamiento de las obras de agua en la ciudad fue posible, en parte por la aplicación de un impuesto a varios bienes de consumo y por la aportación gratuita de trabajo. Sin embargo, a pesar de estas obras, los problemas de abastecimiento de agua no estaban resueltos en la ciudad. En la mayoría de las pilas públicas no alcanzaba a llegar el volumen suficiente de agua para la población. Esto debido a la poca infraestructura en relación al total de habitantes de la época.

3.1.2 Los Conflictos por el Control de Agua.

Los conflictos de agua que se presentaron en el siglo XIX fueron por la indeterminación jurídica sobre la posesión de las mercedes de agua y tierra concedidas en la época. El problema era que las haciendas invadían los límites de la ciudad y no permitían el libre crecimiento. Sin embargo, las haciendas defendían la veracidad de sus títulos virreinales y señalaban que la intención del Ayuntamiento era apoderarse de sus tierras y aguas para beneficiar a un reducido sector de la población. Uno de los conflictos que destaca en este siglo es el de la Hacienda del Rincón. Esto es porque se dio una intensa lucha por el control del agua entre el Ayuntamiento y el dueño de la hacienda, dado que en el siglo XVII fue otorgada en propiedad el agua que nacía en terrenos de la Hacienda y que a su vez abastecía a la ciudad. Como resultado de la serie de conflictos que se dieron por el control del agua y los abusos que se cometieron con el aprovechamiento de las mercedes de agua, el Gobierno Estatal lanzó en 1894 una iniciativa de reglamento de agua. No obstante, hasta 1906 apareció el primer reglamento de uso de las aguas de Morelia, en donde se especificaba entre otras cosas que: el uso público del agua es preferente al privado; la concesión de mercedes de agua es temporal y pueden suspenderse y el uso de las mercedes de agua puede ser transitorio en caso de que haya escasez en las pilas públicas.

3.1.3 La Baja Calidad del Agua y las Obras Implementadas.

El problema de la baja calidad del agua estaba asociado con la enorme cantidad de azolve y materia orgánica que arrastraba el acueducto (por la deforestación en las partes altas y por las algas que se formaban). Esto llevó a la población a usar destiladeras de piedra para purificarla. También la baja calidad del agua estaba asociada con la contaminación que sufría en su captación, conducción y distribución. La baja calidad y contaminación del agua fue un factor determinante en la incidencia a enfermedades hídricas en la ciudad, para lo cual se tuvo que realizar obras de purificación en el Rincón de Guayangareo y entubamiento del agua que allí brotaba. La planta purificadora de agua se construyó entre 1900 y 1904 y según se declara era la primera en su tipo en el país y beneficiaría enormemente a la población de Morelia.

El contrato fue otorgado al Ingeniero Stark que proponía un novedoso sistema de tratamiento de agua a base de filtros mecánicos. Según el mismo contratista, este sistema era de gran aceptación en Europa y Estados Unidos. No obstante, el gobierno estatal señalaba durante el concurso de la obra en 1903, que esa era una de las desventajas del proyecto: “la maquinaria es desconocida entre nosotros y por lo tanto no puede a priori formarse una idea cabal ni de su bondad ni de su valor”, situación que al no evaluarse adecuadamente en su momento, conllevó a que años más tarde se conocieran los riesgos que implicaba para la salud la aplicación de “alumbre” en su tratamiento. Hacia finales de 1910 se construyó la red de distribución de agua por tomas domiciliarias mediante la instalación de tubería. Esta obra sustituyó al antiguo acueducto y a la red de canales que existía en el interior de la ciudad desde el siglo XVI. Se hicieron nuevas obras de introducción de aguas, desechándose el acueducto por ser insuficiente el caudal de aguas

que podía contener para las necesidades de la ciudad, y substituyéndose por una cañería subterránea de regulares dimensiones.

Hubo intentos por entubar el agua desde su nacimiento y hasta la ciudad, sin embargo, sólo fue posible en tramos cercanos a la ciudad, ya que la distancia entre el nacimiento de los manantiales hasta el Rincón, y de éste a la ciudad, era muy significativa, lo que se traducía en elevados costos que difícilmente podían ser sufragados. No obstante, se rehabilitó el canal que conducía el agua desde el Rincón, y que kilómetros adelante se conectaba con la tubería que la conduciría hasta la ciudad. Con estas obras se logró un relativo avance en el mejoramiento de la calidad del agua, al evitar su contaminación desde la captación, conducción y distribución.

3.1.4 La desecación de Ciénagas y las obras del río Grande.

Otro problema sanitario de gran importancia fue el de la formación de ciénagas y pantanos que, según se señalaba, contribuían a la proliferación de enfermedades y epidemias como el paludismo. Estas se formaban en la época de lluvias cuando se desbordaban los ríos e inundaban las tierras cercanas. Sobre todo el río Grande era el más problemático, pues había tramos en que era tal la cantidad de azolve acumulado que se perdía el cauce. De esta forma, el Ayuntamiento en coordinación con el Gobierno Estatal, realizó diversas obras de rehabilitación del río Grande (rectificación de su cauce, fortificación de bordos, limpieza y desazolve, ampliación del claro de un puente que lo cruzaba, reforestación de sus márgenes), con el objeto de evitar inundaciones y formación de ciénagas que afectaban las condiciones sanitarias de la población. Sin embargo se planteaba la necesidad de canalizar todo el cauce del río Grande, desde su nacimiento hasta su desembocadura en el Lago de Cuitzeo, con objeto de controlar de manera más efectiva las inundaciones que afectaban los cultivos y la formación de las ciénagas que ponían en riesgo la salud pública.

3.1.5 Reflexiones Finales.

El problema del agua en la ciudad de Morelia tiene sus orígenes desde su fundación en el siglo XVI. Esto es porque a la par que se tuvieron enormes dificultades técnicas y financieras para realizar las obras de abastecimiento de agua para la ciudad, se presentaron un sin número de problemas por el control y distribución del agua entre los distintos sectores de la población. Más tarde, los conflictos por el agua tendieron a acentuarse con el crecimiento urbano (población, establecimientos comerciales e industriales) y con la expansión de zonas de riego en las inmediaciones de la ciudad. Asimismo, la baja calidad del agua y la formación de ciénagas fue otro elemento que contribuyó a deteriorar las condiciones sanitarias de la población.

En el marco del problema del agua, se pueden identificar diferentes tipos de conflictos y los actores que intervienen. Por ejemplo, están los conflictos por el uso y control del agua para fines productivos entre el Ayuntamiento y los apoderados; por la distribución desigual entre quienes poseían mercedes de agua (grupos de poder) y los que se abastecían de las pilas públicas (pobres urbanos); por el financiamiento de las obras de agua potable

entre el Ayuntamiento y los grupos de poder local. Además, se pueden identificar situaciones similares en distintos momentos históricos como es el caso de:

- a) El Ayuntamiento y su debilidad política, económica y técnica para abordar los problemas asociados con la gestión urbana.
- b) Los problemas de corrupción del Ayuntamiento y su papel como mediador de los intereses de los grupos dominantes.
- c) El control ejercido sobre el agua por algunos grupos de poder.
- d) La población pobre y su acceso limitado al agua y el deterioro de sus condiciones sanitarias.
- e) Actualmente se tienen problemas con el agua en la ciudad debido al crecimiento de la población, la cual exige más agua de la que producen o se extraen de las fuentes de abastecimiento.
- f) Se pierde un porcentaje considerable de agua por fugas en la red de distribución de la ciudad.

3.2 Fuentes de abastecimiento.

3.2.1 Ciclo Hidrológico del Agua.

El origen de las fuentes de abastecimiento que satisfacen al hombre para su desenvolvimiento diario tiene su origen en el ciclo hidrológico, es decir, el movimiento continuo del agua a través de la tierra y la atmósfera.

En la atmósfera, con la ayuda del aire y del sol, el vapor de agua se convierte en humedad, niebla, neblina, rocío, escarcha y nubes. Y como nieve sobre las montañas, o como lluvia o granizo en los valles, se escurre en la tierra, donde la recogen los ríos; y de los ríos va al mar. El mar retiene la sal del agua (que recogió del suelo, la tierra y las rocas que se encontraban en los lugares por donde pasa el río) y la envía a la atmósfera, pura y evaporada. De la atmósfera, el agua cae como lluvia y baja sobre los prados y los campos, nutre las cosechas y la fruta, y corre por los troncos y ramas de las plantas y árboles, llenándolos de flores. Al encontrar grietas en las rocas y el suelo, el agua penetra hacia adentro de la tierra, formando los ríos subterráneos que llenan los pozos; a veces sale en pequeñas cascadas o manantiales. A todo este proceso se le llama “Ciclo Hidrológico”, y gracias a él, probablemente tú volverás a beber esta misma agua cien veces durante toda tu vida.

El agua que tomamos ahora es la misma que se ha estado usando durante millones de años. El agua se mantiene en tres estados: como líquido, gas (vapor) o sólido (hielo), y se recicla constantemente, es decir, se limpia y se renueva trabajando en equipo con el sol, la tierra y el aire, para mantener el equilibrio en la Naturaleza.

3.2.2 Diferentes Fuentes de Abastecimiento.

Debido al ciclo hidrológico se tienen las diferentes fuentes de abastecimiento:

- Agua subterránea.

- Agua superficial.
- Agua atmosférica.
- Agua salada del mar.

Las aguas subterráneas están mejor protegidas a la contaminación. La calidad del agua es más uniforme y su tratamiento es un poco más sencillo. El color natural y la materia orgánica son más bajas en las aguas subterráneas no tienen olor ni sabor, ni contaminación producida por la acción biológica. Estas aguas no son corrosivas debido al bajo contenido de oxígeno disuelto en ellas. La desventaja de esta agua es que no son de fácil acceso, la concentración de sulfuro de hidrógeno es producido por un ambiente de bajo oxígeno por lo que ésta es una de las características de este tipo de agua.

Las aguas superficiales incluyen ríos, lago, arroyos y los acuíferos superficiales no confinados. Una de las ventajas es su disponibilidad y que se encuentran visibles; son fáciles de extraer para el abastecimiento y en caso de estar o ser de mala calidad se les puede dar un tratamiento. Las aguas superficiales son variables en cantidad y se contaminan fácilmente con descargas de aguas residuales y cuando existen zonas de pastoreo animal aguas arriba. Otra de las características de este tipo de aguas es que tienen una alta actividad biológica, la cual puede producir sabor y olor aun cuando el agua ya ha sido tratada. También pueden tener alta turbiedad y color lo cual requieren de un tratamiento adicional.

El agua de lluvia se capta en poblaciones pequeñas, donde el régimen de lluvia es considerable y cuando no es posible obtener aguas superficiales y subterráneas de buena calidad. Para su captación se utilizan los techos de las casas o algunas superficies impermeables para después ser almacenadas en cisternas.

Las aguas saladas se captan en menor cantidad aunque en la actualidad la ingeniería sanitaria tiene nuevas técnicas para potabilizarlas aunque a un costo muy elevado.

3.2.3 Situación del Agua en el Mundo y México.

Más de la mitad de los países del mundo tienen una disponibilidad promedio de agua baja y un tercio ya padece escasez. La disponibilidad promedio de agua en México es baja: 4 mil 900 metros cúbicos por habitante al año, 40 por ciento menos que en Estados Unidos y equivalente a 14 por ciento de la disponibilidad promedio por habitante en Canadá.

En 1955 la disponibilidad promedio de agua era de 11 mil 500 metros cúbicos por habitante, cifra que se redujo a menos de la mitad. Continuar con esta tendencia la cifra se reducirá a 3 mil 500 metros cúbicos al año, pero aunado al efecto del cambio climático este recurso se verá afectado en mayor proporción.

Los factores más importantes en la disponibilidad de agua son la distribución geográfica del recurso, la concentración de la población y sus actividades económicas. La mayor parte de la población y de la actividad económica de México se concentra en el centro, norte y noroeste del país, donde la disponibilidad promedio es de 4 263 m³ por habitante al año, nivel considerado bajo en años de escasa precipitación. En el valle de México la

escasez es inminente: la disponibilidad de agua por habitante, apenas llega a 160 metros cúbicos por día por año.

En México, 70% del agua que llega a las ciudades provienen del subsuelo estas fuentes abastecen aproximadamente a 75 millones de personas, 55 millones de centros urbanos y 20 millones de campo. En 1975 había 32 acuíferos sobre explotados. En la actualidad esta cifra incremento 3.5 veces. La sobreexplotación ha provocado agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, reducción de caudales de los ríos, desaparición de vegetación, pérdida de ecosistema, deterioro de la calidad del agua en los acuíferos y hundimientos del subsuelo. La sobreexplotación ha hecho cada vez más costosa la extracción de agua, ya que se requiere más energía eléctrica y bombear a una profundidad mayor, lo que a su vez encarece el servicio de agua potable.

Llevar agua a todos los rincones del país es costoso. Cada año se extraen aproximadamente 79 km³ de agua para consumo urbano, agrícola, industrial y de servicios. Se calcula que la mitad se desperdicia.

Actualmente el 94.6 % de los habitantes de zonas urbanas del país tiene agua potable y 86.9 % disponen de alcantarillado. En cambio, solo 65.2 % de los habitantes de zonas rurales tienen agua potable y 32.9 % cuenta con alcantarillado. La contaminación del agua provoca graves problemas de salud pública: de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), las enfermedades infecciosas intestinales son una de las principales causas de mortalidad, sobre todo entre menores de 5 años. Gran parte de la población se niega a pagar por el agua. Paradójicamente, los mexicanos gastan cada año alrededor de 200 mil millones de pesos al año en refrescos, cervezas y agua embotellada.

3.2.4 Calidad del agua en México.

La evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales tanto de origen municipal como no municipal.

La DBO5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales.

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van

desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa.

Es oportuno mencionar que los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en zonas con un alta influencia antropogénica. Conforme a su concentración, los criterios que conforman la escala de clasificación de calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua al año 2009 para los indicadores de calidad se realizó conforme a los resultados consignados en las tablas y gráficas subsiguientes.

De acuerdo con los resultados de las evaluaciones de calidad del agua para los tres indicadores de la misma (DBO₅, DQO y SST) aplicadas a los sitios de monitoreo en el año 2009, se determinó que veintidós cuencas están clasificadas como fuertemente contaminadas en algún indicador, en dos de ellos o en todos como el caso del Lago de Patzcuaro, Cuitzeo y Yuriria.

Tabla 3.1 Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua, 2009

Indicador de calidad del agua	Número de sitios de monitoreo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	605
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	646
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	744

Tabla 3.2 Distribución porcentual de acuerdo a indicadores.

Calidad del Agua \ Indicador	SST	DBO ₅	DQO
Excelente	53.5%	41.0%	28.3%
Buena calidad	28.9%	26.8%	22.1%
Aceptable	10.1%	19.7%	18.6%
Contaminada	5.9%	7.9%	23.5%
Fuertemente contaminada	1.6%	4.6%	7.5%

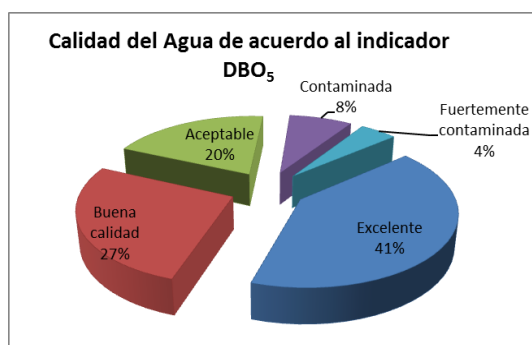


Fig. 3.1 Calidad del agua por el indicador DBO₅.

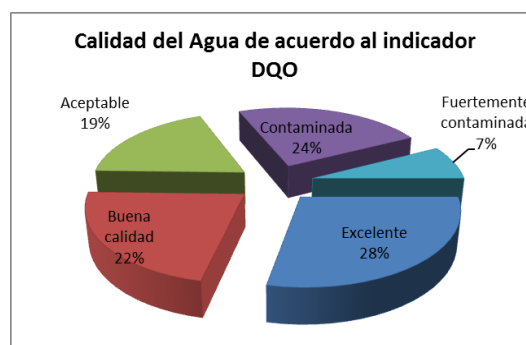


Fig. 3.2 Calidad del agua por el indicador DQO.

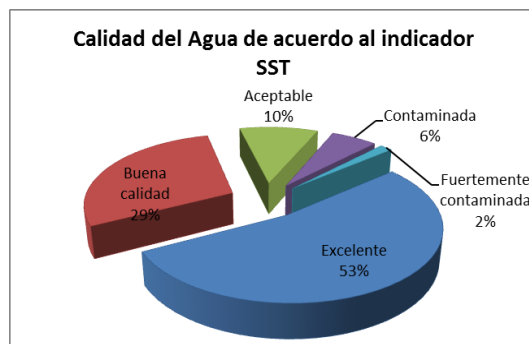


Fig. 3.3 Calidad del agua por el indicador SST.

En cuanto a la calidad del agua subterránea, uno de los parámetros que permite evaluar la salinización de aguas subterráneas son los sólidos totales. De acuerdo a su concentración las aguas subterráneas se clasifican en dulces ($<1,000$ mg/L), ligeramente salobres (1,000 a 2,000 mg/L), salobres (2,000 a 10,000 mg/L) y salinas ($>10,000$ mg/L).

El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que “establece los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano y tratamiento en materia de calidad del agua para consumo humano”.

3.2.5 Fuentes de Abastecimiento de la Ciudad de Morelia.

La disponibilidad del agua en México, por Región Hidrológica se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Disponibilidad del agua en México.

Región Hidrológica	m ³ /habitante/año	Disponibilidad
Frontera Sur	28,400	Alta
Golfo Centro	11,100	Alta
Península de Yucatán	10,900	Alta
Pacífico Sur	10,000	Alta
Pacífico Norte	5,800	Media
Golfo Norte	5,100	Media
Noroeste	3,400	Baja
Balsas	2,900	Baja
Lerma-Santiago-Pacífico	1,900	Baja
Península de Baja California	1,400	Baja
Río Bravo	1,300	Baja
Cuencas C. del Norte	1,000	Baja
Valle de México	227	Baja

El municipio se ubica en la Región Hidrográfica XII, conocida como Lerma-Santiago, particularmente en el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro. Esta comprende parte de los Estados de México, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Nayarit y por supuesto Michoacán.

Tabla 3.4 Hidrografía de Morelia.

HIDROGRAFÍA DE MORELIA	
Región Hidrológica	Lerma-Santiago (93.00%) y Balsas (7.00%).
Cuenca	Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Lago de Yuriria (89.14), Río Cutzamala (4.18%), Río Lerma-Chapala (3.86%) y Río Tacámbaro (2.82%).
Subcuenca	Lago de Pátzcuaro (89.00%, Río Purungueo (4.18%), Río Angulo (3.86%), Río Carácuaro (2.82%) y Lago de Cuitzeo (0.14%).
Corrientes de agua	<u>Perenes</u> : Grande de Morelia, Tupátaro, El Tejocote y Los Sauces. <u>Intermitentes</u> : Chiquito, Santa Inés, Los Huiramos, El Tecolote, Los Pirules, San José, El Guayabito, Loma Larga, La Higuera, Jaripeo, La Joya, La Tinaja y San Andrés.
Cuerpos de Agua	<u>Perenes</u> (0.51%): El Padre, Amando, Loma Caliente, Cointzio, El Bañito, La Mintzita, Los Venares y Umécuaro. <u>Intermitente</u> (0.20%): Llano de Rosas.

Se considera dentro de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro - Cuitzeo y Lago de Yuriria y al mismo tiempo pertenece a la Subcuenca del Lago de Pátzcuaro. La primera incluye diecinueve municipios: Pátzcuaro, Tzintzunzan, Quiroga, Erongarícuaro, Morelia, Tarímbaro, Charo, Álvaro Obregón, Copándaro, Huandacareo, Queréndaro, Zinapécuaro y Cuitzeo entre los más importantes.

Al interior del municipio los principales ríos son el Río Grande y el Río Chiquito, el primero es considerado como una corriente de agua perenne, mientras que el segundo figura como una corriente intermitente, su flujo se ubica en el siguiente mapa.

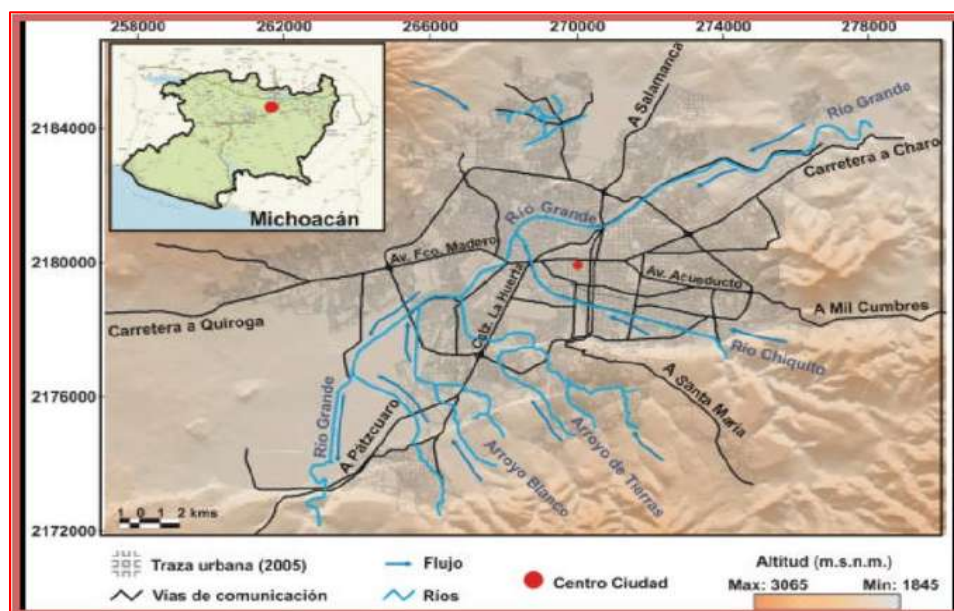


Fig. 3.4 Principales afluentes de la cuenca del río Grande de Morelia.

Sus arroyos más conocidos son la Zarza y la Pitaya. Su presa más importante es la de Cointzio, aunque cuenta con otras menores como las de Umécuaro y Loma Caliente,

además del cráter volcánico cuyo interior contiene agua conocido como La Alberca, ubicado al noroeste de la ciudad.

Entre sus manantiales más importantes destaca La Mintzita por el volumen de agua que aporta para el consumo de la ciudad, además de otros de aguas termales que son aprovechados como balnearios, figurando Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas.

La ciudad de Morelia utiliza el agua para uso urbano-doméstico de las siguientes fuentes:

- Presa de Cointzio
- Manantial de San Miguel
- Manantial de La Mintzita
- Manantial El Salto y La Higuera
- Pozos profundos (91)

Menos de la mitad del agua que se sirve a la ciudad se obtiene por escurrimiento, esto es por gravedad, sin necesidad de inversión o gasto electromecánico, pero casi un 70 % del total del agua servida se debe mover por acción electromecánica con el correspondiente costo de energía eléctrica. Morelia ha crecido en ambos márgenes de los ríos que originalmente la circundaban y tira sus aguas residuales en aquellos que a través del Valle Morelia-Queréndaro las vierte en el Lago de Cuitzeo, laguna natural de oxidación de aguas residuales que impide que los residuos orgánicos lleguen al cauce del Río Lerma, razón por la que nuestra subcuenca no tiene prioridad en los programas federales de saneamiento de cuencas.

Para su abastecimiento la ciudad cuenta con tres fuentes básicas: una presa llamada Cointzio que es utilizada para riego y para agua potable, de manantiales cuyos nombres son la Mintzita, San Miguel, El Salto y La Higuera y de agua subterránea a través de 91 pozos localizados en la mancha urbana de la ciudad. La capacidad total del suministro es un poco más de 3,000 lps, de ellos 600 lps provienen de la presa, 849 lps de los manantiales y 1588 lps de los pozos.

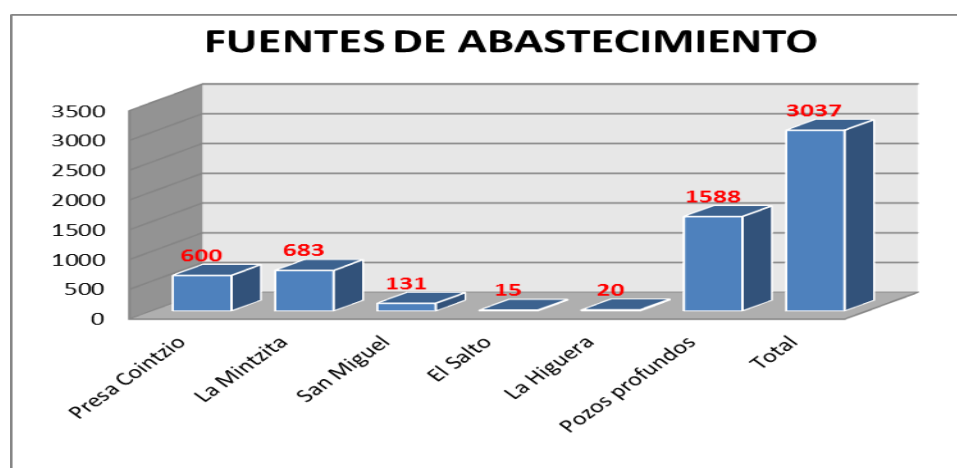


Fig. 3.5 Fuentes de abastecimiento de la ciudad de Morelia.

La ubicación de la ciudad de Morelia le permite contar con recursos hidráulicos superficiales que son aprovechados como fuentes de abastecimiento de agua potable.

Para satisfacer la demanda urbana de Morelia se utiliza agua que es extraída del embalse formado por la presa de Cointzio. Esta fuente es una de las principales para la ciudad y se encuentra ubicada sobre el Río Grande de Morelia, aproximadamente a 11 km al suroeste de la ciudad. La construcción de esta presa se inició en 1936 y concluyó en 1940 y el objetivo principal de esta construcción es el aprovechamiento de agua potable para la ciudad de Morelia, riego y control de avenidas en el valle de Morelia-Queréndaro. En años atrás esta presa generaba energía eléctrica pero actualmente ya no se le da ese uso. La presa de Cointzio se le ha asignado un gasto de 600 lps destinado para el consumo humano: el agua se conduce a la planta potabilizadora de la ciudad.

Otra fuente de agua subterránea no menos importante que hay en la ciudad es el Río Chiquito, el cual se puede embalsar aguas arriba por los filtros viejos; pero para eso se tiene que hacer un estudio para determinar la capacidad de extracción de agua en esa fuente.

Las aguas subterráneas constituyen también una fuente de abastecimiento de agua potable, para ello se aprovechan el agua de cuatro manantiales; dos de ellos se encuentran a pocos kilómetros de la ciudad y los otros dos se encuentran dentro de la ciudad, y de 91 pozos. (Fig. 3.6)

Manantial la Mintzita. Es la fuente de agua subterránea más importante, se encuentra ubicado a 4.5 km hacia el suroeste de la ciudad. Aporta aproximadamente 683 lps que representa el 24% de la producción total para el suministro de Morelia. En la actualidad se tienen dos concesiones para su extracción, una por parte de una industria papelera llamada CEPAMISA y otra por parte del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS).

Para el mes de Septiembre del 2013 entrará en operaciones la planta tratadora de los Itzícuaros, de la que se extraerán 210 litros por segundo de agua provenientes del complejo a la papelera Scribe (parte de la papelera Crisoba antes CEPAMISA), quienes a su vez dejarán de utilizar 350 litros de agua pura del Manantial de la Mintzita que se redistribuirán para dar abasto popular a más de 300 colonias del Sur Poniente de Morelia

Manantial San Miguel.- el cual se ubica a una distancia aproximada de 11 km al sureste de la ciudad en el poblado de San Miguel del Monte. El agua producida por este manantial está siendo captada por OOAPAS y tiene una producción de 131 lps.

Manantiales El Salto y La Higuera.- estas fuentes se localizan al poniente dentro de la misma ciudad, se ubican en una zona llamada La Quemada. Los manantiales tienen una producción de 15 y 20 lps respectivamente, y el agua que se extrae es para abastecer a las colonias cercanas a los manantiales.

91 pozos.- ubicados en toda el área urbana de la ciudad son utilizados como complemento al suministro de agua potable, los cuales varía en profundidad y en

producción, aportando un total de 1588 lps. Además existen 92 pozos registrados y autorizados por la CNA para ser explotados por particulares.

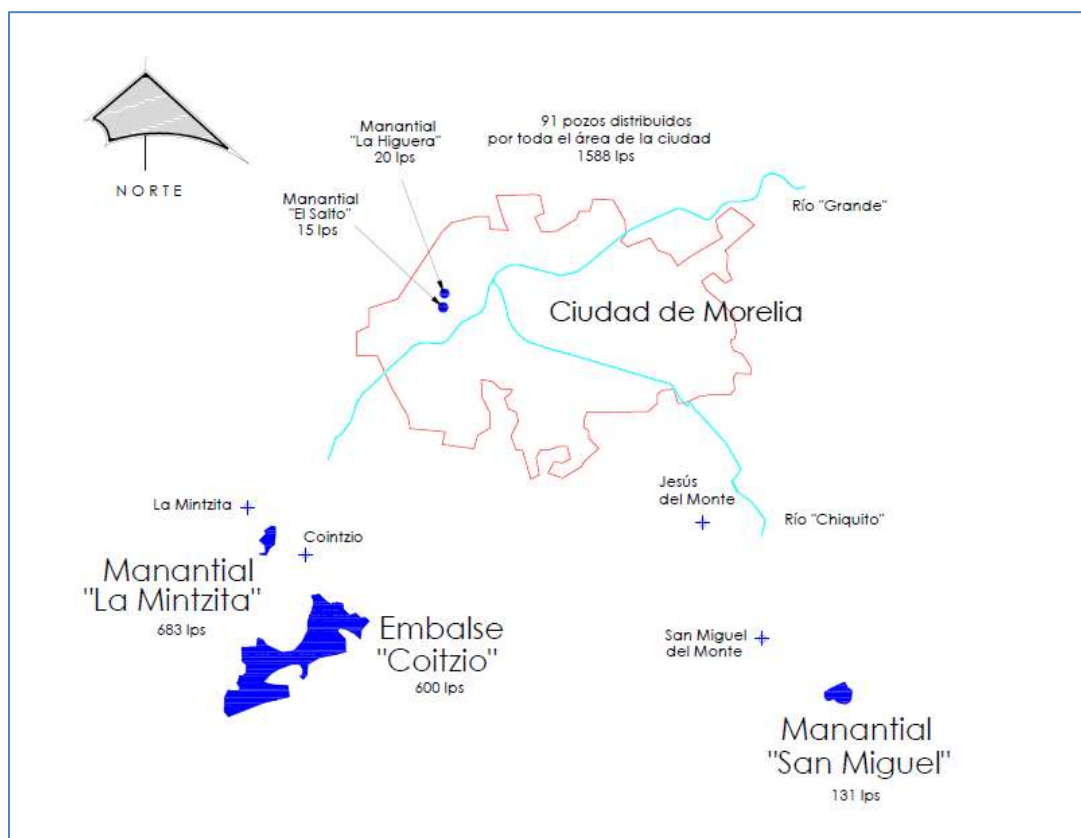


Fig. 3.6 Ubicación de las fuentes de abastecimiento de la ciudad de Morelia.

3.3 Demandas.

3.3.1 Antecedentes.

Los balances hídricos muestran un aprovechamiento desigual a la disponibilidad natural; la distribución no proporcional de las regiones de alta demanda con las de alta disponibilidad natural han resultado en que una gran extensión del país presente problemas de sobreexplotación de acuíferos, escasez y contaminación.

Aunado a esto, existen fallas institucionales en el manejo del recurso (por ejemplo, tarifas que no cubren el costo marginal del agua y la falta de cobro de los derechos sobre su uso) derivan en una baja eficiencia e incentivan usos no económicos del agua. Para lograr políticas que promuevan un uso eficiente y equitativo del recurso hídrico, es necesario contar con información detallada sobre las características de la demanda por agua. Lo anterior, a fin de conocer la aportación económica del agua a las diferentes actividades económicas y al bienestar de los hogares, así como para tener estimaciones del potencial de ahorro por mejoras en la eficiencia del uso. A la fecha, la información a este respecto es insuficiente y en muchos casos carece de una base de datos confiable, por lo que resultan indispensables proyectos de investigación sobre el tema.

3.3.2 Conservación del Agua.

Cada vez existe una mayor concientización sobre la existencia tan limitada de los recursos hidráulicos. El agua debe ahorrarse, se deben encontrar maneras de usarla en menores cantidades, así como para su reutilización, y para desarrollar metodologías para mejorar su manejo. La conservación del agua puede tomar significados distintos para cada persona. Podría interpretarse como la posibilidad de captar agua de lluvia en pequeños almacenamientos, para usos domésticos, o en vasos de almacenamiento con la edificación de presas. En la recarga de acuíferos subterráneos por ejemplo, el usar menor cantidad de agua, cuando sea posible, se logra ahorrar agua de mejor calidad. El campo de la conservación del agua es todo esto. Es cuestión de reducir la demanda de agua, promoviendo austeridad en los hábitos de consumo, evitando desperdicios, disminuyendo consumos, cobrando el agua con tarifas adecuadas. Es también cuestión de utilidades de la evolución de tecnología y de las técnicas de administración del agua y de sus usos; de coordinación entre la planeación y administración de los recursos hidráulicos, la planeación del uso del suelo y la planeación económica y social; de proporcionar normas y reglamentos nuevos o actualizados. En resumen, la conservación del agua es la optimización de su uso.

Vale la pena enfatizar que, excepto para sequías y en condiciones extremas, una política de conservación del agua no debe conducir a reducciones arbitrarias en el nivel de consumo, a expensas de la calidad de vida de la población. Su propósito fundamental es otro: el manejo racional de un recurso limitado, indispensable para la vida.

3.3.3 Ventajas de las Políticas del Agua.

Existen numerosas razones para actuar e implementar una campaña de conservación del agua dentro del ámbito de un sistema de abastecimiento. Entre los usos que más destacan son los siguientes:

- a) Ocurrencia de sequías y avenidas por efecto del Cambio Climático.
- b) Mejoramiento y optimización de la operación de los sistemas de abastecimiento de agua existentes.
- c) Posponer las inversiones para instalaciones hidráulicas.
- d) Reducción del consumo de energía.
 - i. Ahorro de energía en los procesos de producción de agua.
 - ii. Ahorro de energía en el uso del agua, tomando en cuenta que parte del agua usada se calienta.
 - iii. Ahorro de energía en la operación de los sistemas de alcantarillado y de tratamiento de aguas residuales, como resultado de la disminución de las descargas de aguas residuales.
- e) Reducción de las descargas al sistema de alcantarillado.
- f) Presión de la opinión pública.

3.3.4 Conservación del Agua en el Abastecimiento y Consumo.

Una política adecuada de administración de los recursos hídricos implica la necesidad de la conservación del agua, tanto en el abastecimiento como en la demanda. Respecto al abastecimiento, la conservación se logra con el aprovechamiento de los recursos hidráulicos disponibles, y midiendo, con el propósito de incrementar esos recursos; además de las acciones para mejorar las eficiencias de los sistemas de conducción. Entre dichas acciones se pueden mencionar el reemplazo y renovación de las tuberías viejas, manejo adecuado de las presiones en la red, reparación de fugas y reducción de pérdidas en las plantas de tratamiento de agua como en las conducciones superficiales, así como capacitación del personal encargado del suministro.

En cuanto a la conservación del agua durante su consumo, se puede hacer referencia a los programas de educación y de información ciudadana, políticas de estructuras tarifarias, a la preparación de la legislación (por ejemplo la relacionada con las características de las instalaciones domiciliarias, a la obligatoriedad de instalar dispositivos de bajo consumo, reglamentos para jardines privados, control estricto de las fuentes de contaminación, acondicionamiento de las características de los efluentes) y el reciclaje y reutilización de las aguas residuales.

3.3.5 Consumo.

El consumo es la parte del suministro de agua potable que generalmente utilizan los usuarios, sin considerar las pérdidas en el sistema. Se expresa en unidades de m³/día o litros/día, o bien, cuando se trata de consumo per cápita se utiliza litro/hab/día.

El consumo de agua se determina de acuerdo con el tipo de usuarios, se dividen según su uso en: doméstico y no doméstico; el consumo doméstico, se subdivide según la clase socioeconómica de la población en residencial, medio y popular. El consumo no doméstico incluye el comercial, industrial y de servicios públicos; a su vez, el consumo industrial se clasifica en industrial de servicio e industrial de producción (fábrica), esta clasificación se resume en el siguiente diagrama:

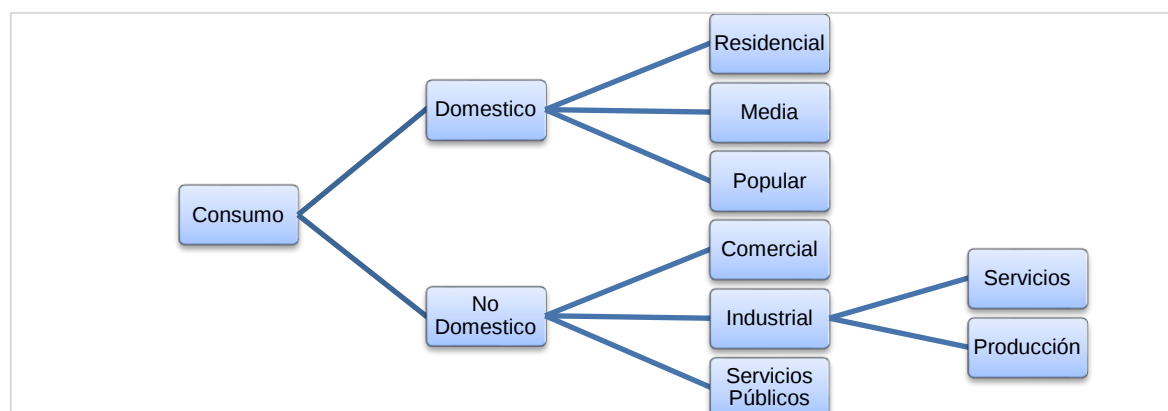


Fig. 3.7 Consumo de agua.

3.3.5.1 Consumo Doméstico.

Se refiere al agua usada en las viviendas. Este consumo depende principalmente del clima y la clase socioeconómica de los usuarios. El consumo doméstico medio de una clase socioeconómica puede presentar diferencias, por diversidad de causas, entre las que sobresalen; la presión en la red, la intermitencia del servicio, la superficie del abastecimiento del agua, la existencia de alcantarillado sanitario y el precio del agua.

Tabla 3.5 Consumo doméstico.

CLASE SOCIOECONÓMICA	DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE VIVIENDA
Residencial	Casas solas o departamentos de lujo, que cuentan con dos o más baños, jardín de 50 m ² o más, cisterna, lavadora.
Media	Casas y departamentos, que cuentan con uno o dos baños, jardín de 15 a 35 m ² y tinaco.
Popular	Vecindades y casas habitadas por una o varias familias, que cuentan con jardín de 2 a 8 m ² , con un baño o compartiéndolo.

3.3.5.2 Consumo no Doméstico.

Consumo comercial. Es el que se utiliza en zonas de comercios y servicios por persona que no habitan en ellas.

Consumo industrial. Este consumo lo constituye el agua para empresas, fábricas y hoteles; se determina en función del tipo de industria. Considerando el tipo de actividad industrial, el consumo se divide en dos tipos: industrial de servicios e industrial de producción. En el primero se consideran los hoteles y el consumo personal de los empleados y los segundos, dependen del tipo de industria que se trate. Es común encontrar industrias en las que el suministro de agua se complementa con fuentes auxiliares, con lo que se logra disminuir el consumo de agua municipal. En estos casos será necesario, determinar la cantidad de agua de la red municipal que se destinará para tal fin, y cuánta será proporcionada por dichas fuentes, para que en el gasto de diseño se considere sólo el volumen que abastecerá la red.

Servicios públicos. Es el agua que se utiliza en instalaciones de salud, educación, recreación, seguridad, riego de parques y jardines, salvo en casos especiales, se considera innecesario proyectar sistemas de abastecimiento de agua potable que incluyan protección contra incendios.

3.3.6 Demandas.

La demanda actual es la suma de los consumos para cada tipo de usuario más las pérdidas físicas.

Los consumos por tipo de usuarios se obtienen:

- 1) Consumo doméstico. Multiplicado por el per cápita de cada sector socioeconómico por la población correspondiente.

- 2) Consumo comercial. Producto del consumo de cada local por el total de locales, de los comercios existentes en el sistema.
- 3) Consumo industrial de servicios. Se obtiene de multiplicar los consumos de cada trabajador por el total de trabajadores de cada una de las industrias de la localidad.
- 4) Consumo industrial de producción. Se obtiene en forma particular de cada industria de acuerdo con sus necesidades, o bien, multiplicando el consumo por unidad de producción por su volumen de producción de cada fábrica.
- 5) Consumos públicos. Producto del consumo, en hospitales y en escuelas, de cada paciente o estudiante por el total de enfermos o alumnos, respectivamente; también habrá considerar el consumo de parques y servicios contra incendio, cuando sea el caso.
- 6) Pérdidas de agua. Volumen que se pierde en el sistema de distribución.

La demanda es función de factores como:

- a) Clase socioeconómica. La demanda crece conforme se incrementa el nivel económico de la población, debido a que cambian hábitos de uso del agua.
- b) Porcentaje de cada clase socioeconómica. En general a mayor proporción de niveles residenciales la demanda se incrementa.
- c) Tamaño de la población. La demanda aumenta a medida que la población de una ciudad o región se incrementa, debido a que crecen sus requerimientos de agua para uso público e industrial.
- d) Características de la población. El consumo per cápita dependerá de la actividad principal y costumbres de la población.
- e) Clima. La demanda de agua aumenta en poblaciones donde la temperatura es más elevada que en las zonas templadas.
- f) Existencia de alcantarillado. Cuando la comunidad cuenta con sistemas de saneamiento que utilizan alcantarillado para la disposición de sus desechos, se incrementa la demanda de agua potable.
- g) Tipo de abastecimiento. La demanda en poblaciones que cuentan con un sistema formal de abastecimiento, es mayor que en aquellas que cuentan con un sistema más rudimentario.
- h) Calidad de agua. La demanda de agua es mayor cuando su calidad es buena ya que se diversifican sus usos.
- i) Precio del agua. Al aumentar el precio del agua, disminuye la demanda.

Las pérdidas físicas se refieren al agua que se escapa por fugas en líneas de conducción, tanques, red de distribución y tomas domiciliarias. En estudios de campo se ha definido que estas pérdidas se determinan a partir de muestreos de inspección y aforo (fugas en tomas domiciliarias); de medición en sectores controlados, llamados distritos hidrométricos (fugas en tuberías principales y secundarias y pérdidas en tomas

clandestinas) y de verificación de un grupo de micro medidores domiciliarios (pérdidas por mala medición).

Las pérdidas de agua dependen de factores tales como: la presión de trabajo, la calidad de la tubería y los accesorios, el proceso constructivo, el tipo de material, la antigüedad de los elementos del sistema y el mantenimiento preventivo y correctivo que se les aplique a los elementos del sistema.

Las consideraciones que sirven para orientar al proyectista en la evaluación de los porcentajes de las pérdidas, son las siguientes:

- a) Si se dispone de presupuesto y tiempo, establecer el valor de las pérdidas con fundamentos en un estudio de evaluación.
- b) Considerar un valor promedio del volumen diario de pérdidas, obtenido de acuerdo a una o varias localidades similares en cuanto a nivel socioeconómico, tamaño de población, ocurrencia de fugas, etc., que ya dispongan de un estudio similar al del inciso anterior.
- c) En caso de no disponer de información, se puede considerar un valor comprendido entre el 40 % y el 60 % del volumen suministrado, que es el resultado del estudio de campo de 21 ciudades de la República Mexicana.
- d) De acuerdo con experiencias nacionales e internacionales, se estima que en localidades donde se tenga implementado un programa de detección y control de fugas, se puede aspirar a reducir el porcentaje de fugas entre el 1 % y el 2 % anualmente; razón por la que se puede esperar que en el mediano plazo (5 a 10 años) las fugas sean del orden de 30 %.
- e) En ciudades que desarrollan un programa de detención y control de fugas de manera eficaz y eficiente, las pérdidas pueden disminuirse en un 20% (5 a 10 años), hasta reducirse a un nivel del 20%, que es el resultado obtenido en algunas ciudades Europeas y Nacionales.
- f) En ciudades de países muy desarrolladas como es el caso de algunas de Estados Unidos y Canadá se ha logrado obtener hasta porcentajes de pérdidas de 15% y aún menores.

3.3.7 Dotación.

La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas físicas en el sistema, en un día medio anual; sus unidades están dadas en litros/hab/día. La dotación media de la localidad (Tabla 3.6) se obtiene a partir de un estudio de demanda, dividiendo el consumo total, que incluye servicio doméstico, comercial, industrial y de servicios públicos, y las pérdidas físicas de agua, entre el número de habitantes de la localidad. Cabe hacer la aclaración que para el diseño de los elementos de un sistema de agua potable, se calculará la dotación particular que le corresponde a cada zona (habitacional: residencial, media o popular; comercial o industrial).

Tabla 3.6 Dotación por habitante en Morelia en el 2010.

Dotación por Habitantes en Morelia año 2010	
Dotación por habitante servido	389 lts/hab/día
Dotación por habitante total	354 lts/hab/día

La ciudad de Morelia, al igual que el resto del estado, presenta un rezago en la dotación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Debido principalmente al crecimiento anárquico que obliga a dar soluciones forzadas y no planeadas. La problemática es que el organismo potabilizador OOAPAS opera de manera deficitaria y buena parte de su labor diario es precisamente resolver problemas derivados de esta situación. La zona urbana de Morelia recibe una gran presión en la demanda de servicios públicos, debido a los índices de crecimiento de las zonas conurbadas. Esto es consecuencia del fenómeno de migración que presenta el medio rural al urbano, para acceder a mejores condiciones de vida.

3.4 Procedimientos de Gestión.

Para abastecer de recurso hidráulico a la ciudad de Morelia, ésta es conducida de las fuentes de abastecimiento a través de líneas de conducción a gravedad y con ayuda de equipo electromecánico (Fig. 3.8), como se explica a continuación:

Línea de Conducción de la Presa Cointzio a la Planta Potabilizadora.

La línea de conducción tiene su origen en embalse, la cual se encuentra localizada al suroeste de la ciudad en línea recta. La obra de toma se encuentra a una elevación de 1975 m.s.n.m.

A la salida de la presa la conducción se hace por medio de dos tubos de acero de 20" y 16" de diámetro, los cuales descargan a un canal de 0.87 por 1.40 metros; desde este punto la conducción desarrolla 12,400 metros hasta la planta potabilizadora, en la entrada de la planta, el agua es conducida ya por un tubo de acero de 24" de diámetro.

El gasto producido es constante las 24 hrs. Ya que las válvulas de control no sufren ninguna maniobra. Sin embargo observaciones realizadas en la planta potabilizadora de los 600 lps de gasto que sale de la presa únicamente 420 lps llegan a la planta, lo cual se concluye que existen extracciones clandestinas a lo largo de la conducción. La capacidad de esta planta es de 540 lps.

Línea de Conducción del Manantial La Mintzita al Cárcamo de Bombeo.

La obra de toma concesionada por OOAPAS, está equipada con una compuerta para controlar el flujo del agua hacia la línea de conducción, esta obra se localiza a una distancia aproximada de un kilómetro con respecto a la toma de la empresa papelera, siendo este sitio el origen de la línea de conducción a gravedad llevando un gasto de 683 lps que es el gasto concesionado por el OOAPAS para la demanda urbana de la ciudad, la cual tiene un desarrollo aproximado de 4,400 metros y consiste en un tubo de concreto reforzado de 60" de diámetro. La descarga en el cárcamo de bombeo Mintzita se realiza

en forma libre y con un tubo parcialmente lleno. El cárcamo de bombeo se encuentra ubicado al poniente de la ciudad, está equipado con ocho equipos de bombeo, de los cuales 5 bombean a la planta potabilizadora transportando 550 lps y los otros tres lo hacen hacia el tanque Tzindurio llevando los 133 lps restantes. El cárcamo tiene una profundidad total de 10 metros el desnivel entre plantillas de la obra de toma y la descarga es de 1.30m

Línea de Conducción del Manantial San Miguel a la Planta Potabilizadora.

Tiene su origen en el nacimiento del manantial cerca del poblado de San Miguel del Monte y tiene una longitud de 17,000 metros hasta la Planta Potabilizadora de la ciudad. La línea de conducción consiste en un canal abierto y el agua es conducida por gravedad.

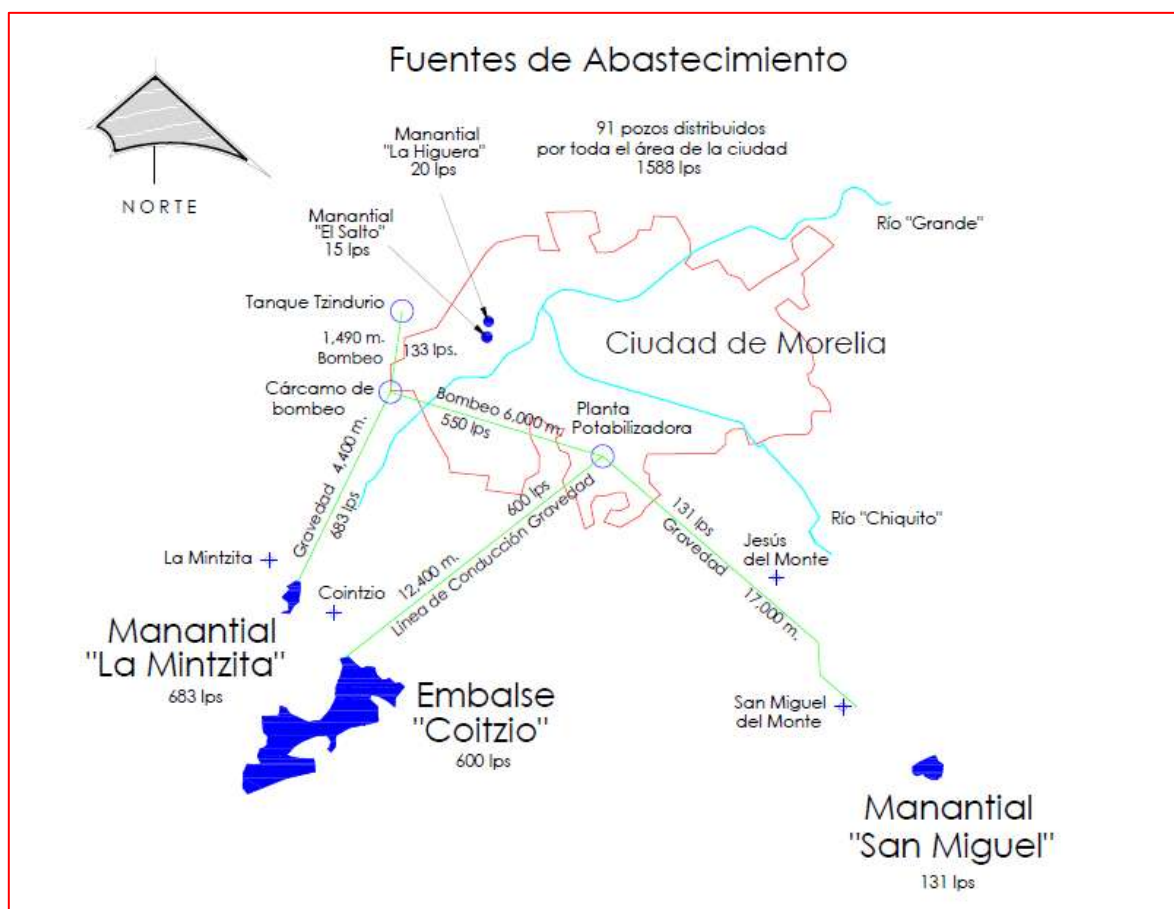


Fig. 3.8 Conducciones de abastecimiento de recurso hídrico para Morelia.

3.5 Evolución de la Demanda Urbana.

Para efectos de planeación a futuro es importante determinar la demanda futura. Esta demanda se calcula con base en los consumos de las diferentes clases socioeconómicas, la actividad comercial, industrial, la demanda actual, el pronóstico de crecimiento de la población y su actividad económica.

Para la predicción de la demanda se debe considerar lo siguiente:

- La proyección del volumen doméstico total se realiza multiplicando los valores de las proyecciones de población de cada clase socioeconómica, por sus correspondientes consumos per cápita para cada año, dentro del horizonte de proyecto.
- Cuando las demandas comercial, industrial y turística sean poco significativas con relación a la demanda doméstica, y no existan proyectos de desarrollo para estos sectores, las primeras quedan incluidas en la demanda doméstica.
- Cuando las demandas de los sectores comerciales: industrial y turístico sean importantes, deberán considerarse las tendencias de crecimiento histórico con los censos económicos o con proyectos de desarrollo, del sector público o de la iniciativa privada, y se aplicarán los consumos de cada sector a las proyecciones correspondientes.
- Por lo que se refiere a las pérdidas físicas de agua, su valor se estima a partir de su comportamiento histórico tomando en cuenta los proyectos de mantenimiento y rehabilitación probables, así como el establecimiento de un programa de control de fugas.

La evolución de la demanda para la ciudad de Morelia (Tabla 3.7), ha estado en variación constante durante los últimos años debido al crecimiento de la población, así que se tienen diferentes demandas según el año a analizar y éstas serán calculadas a partir de datos estadísticos de población proporcionados por el INEGI, éstos son los siguientes:

Tabla 3.7 Evolución de la población de Morelia al 2010.

Año	Población
1940	77,622
1950	106,722
1960	153,481
1970	218,083
1980	353,055
1990	489,756
1995	578,061
2000	620,532
2005	684,145
2010	729,757

4 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA CUENCA

4.1 Importancia de los modelos de gestión.

Las crecientes presiones antrópicas sobre los recursos hídricos, de naturaleza variable, ha condicionado en muchas cuencas la necesidad de establecer complejas infraestructuras hidráulicas para garantizar las demandas consuntivas y ambientales.

Esta creciente complejidad de los sistemas hidráulicos ha motivado el desarrollo de herramientas matemáticas que faciliten el análisis de su comportamiento y su gestión integral.

Estos modelos, que constituyen sistemas de soporte de decisión, se han venido desarrollando en las últimas décadas, principalmente en Estados Unidos y en el norte de Europa, siendo en España de implantación reciente.

La razón de ellos es que los modelos son el único medio para arrojar información sobre la planificación, operación y formulación de políticas de gestión de sistemas que tengan cierto grado de complejidad. Además el uso y desarrollo de un modelo son de gran ayuda para un mejor conocimiento del sistema y una mejor organización de los datos.

Los dos problemas básicos que los modelos de simulación ayudan a resolver son:

1. Cómo planificar la ampliación de los sistemas complejos de recursos hidráulicos para satisfacer las necesidades futuras.
2. Como tomar decisiones sobre el modo más conveniente de operar los elementos de regularización para optimizar el uso del agua y aumentar las garantías de servicios a los usuarios (reglas de explotación del sistema).

La necesidad de una rigurosa evaluación de diferentes alternativas de regularización (infraestructuras básicas, nuevas presas y canales) o reglas de explotación (criterios para bombeos y desembalses) exige, inevitablemente, el apoyo de modelos de simulación, con la complejidad necesaria para abarcar los aspectos sustanciales del problema concreto.

En pocas palabras, un modelo matemático de gestión de sistemas de embalses no es sino un complejo procedimiento de balance de entradas/salidas en cada uno de los elementos del sistema.

Para la elección de un modelo de gestión adecuado a las características de la cuenca en estudio y a los objetivos que se pretenden alcanzar, se requiere en primer lugar, un análisis detallado de las características de los modelos más utilizados en este campo.

4.2 Tipos de Modelos para un Sistema de Recursos Hídricos.

Un modelo de un sistema puede ser definido como una conceptualización del mismo que preserva sus características esenciales para el fin que nos ocupa, sin necesidad de conservarlas todas. Según esta definición cualquier pensamiento es un modelo, incluso lo que vemos es un modelo creado por muestra mente, basándose en la información visual.

Los modelos de gestión utilizados actualmente se clasifican, de forma general, en dos categorías: los basados en reglas y los de optimización.

Los modelos basados en reglas se caracterizan porque el funcionamiento del sistema hidráulico se define y limita con base en reglas de gestión que se establecen a priori.

Los modelos de optimización, por contra, son capaces de definir las reglas de funcionamiento óptimo del sistema, a partir del establecimiento de unos objetivos a alcanzar para una serie de variables (hidráulicas, de consumo energético, de calidad del recurso, entre otras).

Los modelos de reglas, que fueron los primeros en desarrollarse, son más sencillos desde el punto de vista conceptual, pero presentan el inconveniente de no asegurar que el sistema alcance condiciones de funcionamiento óptimo.

Los modelos de optimización no presentan este inconveniente, pero su utilización puede resultar en el planteamiento de condiciones de funcionamiento no aplicables en la práctica. Por ello es habitual que muchos de estos modelos sean híbridos de los anteriores, pudiendo incorporar reglas de funcionamiento concretas.

Por tanto hay varios tipos de modelos, entre algunos, los siguientes:

- Descriptivos.
- Gráficos.
- Experimentales o de juicio.
- Análogos.
- A escala o físicos.
- Matemáticos.

Y todos los anteriores pueden ser usados en la toma de decisiones. Los modelos matemáticos son los más fáciles de transmitir de forma intacta a otras personas y son más precisos que los anteriores cuantitativamente pero no cualitativamente. Hay que tener siempre bien presente que los modelos matemáticos, son herramientas al servicio del juicio ingenieril y no sustitutos del mejoramiento del mismo.

4.2.1 Modelos Matemáticos.

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados atendiendo a diversos conceptos, por lo que existen multitud de clasificaciones.

Veamos a continuación algunas clasificaciones posibles:

1. Una clasificación obvia sería atendiendo al proceso modelado, así tenemos modelos:
 - Lluvia-escorrentía.
 - Crecidas.
 - Síntesis hidrológica.

- Flujo subterráneo.
- Gestión de embalses (Gestión de Cuencas).
- Escorrentía urbana.
- Estuarios y lagos.
- Etc.

Algunas de las características anteriores podrían reagruparse en modelos de hidrología superficial y/o subterránea. Podría también hablarse separadamente o conjuntamente de modelos de calidad, si incluyen esta característica del agua, o de modelos económicos si contemplan este aspecto del sistema.

2. Los modelos hidrológicos generalmente se clasifican en Estocásticos si las variables del modelo son contempladas como variables aleatorias, con distribuciones de probabilidad. En el caso de que esto no sea así y se desprecien los ruidos aleatorios y las relaciones se supongan perfectamente determinadas o únicas, el modelo se califica como no estocásticos o determinístico.
3. Modelo basado en observaciones de datos físicos reales, de las cuales se extraen ciertas consecuencias, el modelo sería empírico. Así que si un modelo es conceptual si es basado en alguna teoría básica o sin coeficientes empíricos.
4. Se dice que un modelo es lineal, si las relaciones matemáticas pueden suponerse lineales y por lo tanto puede aplicarse el principio de superposición. De no ser de esta manera, el modelo sería no lineal.
5. Si la distribución espacial de las características físicas y de localización de actuaciones en el sistema se tiene en cuenta, el modelo se dice distribuido, y si no, se dice agregado. Normalmente los modelos distribuidos incluyen la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, mientras que los agregados solo ecuaciones diferenciales ordinarias.
6. Un modelo es estacionario si las relaciones entradas-salidas no dependen del tiempo; de lo contrario el modelo es no estacionario o transitorio si llegan a depender del tiempo.
7. Según el problema que pretenda resolver, el uso que se le dé, un modelo puede ser:
 - a. De predicción o de simulación, si se utiliza para conocer “que pasaría si...”, también llamados descriptivos.
 - b. De optimización, si el modelo modifica internamente los valores de los datos controlables (que en este momento pasan a ser variables) y/o las variables para alcanzar el óptimo valor de una función objetivo previamente definida. A su vez los modelos de optimización pueden subdividirse en varias clases según la técnica de optimización utilizada.
 - c. De identificación, en estos modelos los datos que eran incontrolables pasan a ser las variables o incógnitas a ser determinadas.
8. Los modelos pueden clasificarse según las ecuaciones matemáticas utilizadas e incluso los métodos numéricos utilizados para resolver esas ecuaciones.
9. Si la configuración física del sistema se considera conocida e invariable y lo que trata de determinar es la gestión del mismo, el modelo será de gestión o de

operación. En cambio si se utiliza el modelo para determinar la secuencia óptima de escalonamiento de infraestructura y de aprovechamiento, se trata de un modelo de inversión o de planificación.

4.2.2 Simulación y Optimización.

Se han utilizado los términos de simulación y optimización para clasificar los modelos matemáticos, estos se pueden utilizarse en un sentido más amplio, como a continuación se explica.

Simulación es una técnica para resolver problemas que utiliza el siguiente esquema:

1. Desarrollo de un modelo.
2. Operación del modelo utilizando unos valores de los datos controlables.
3. Observación e interpretación de resultados y con estos datos resolver el modelo con nuevos valores con los datos controlables que esperamos que mejoren las propiedades del sistema.

Optimización es una técnica que utiliza los siguientes pasos:

1. Desarrollo de un modelo.
2. Operación del modelo. Éste dará como resultado unos valores de las variables de control que optimizan la función objetivo que hayamos utilizado.

Es muy común estar en el dilema “¿simulación u optimización?”, y analizar las ventajas e desventajas de una técnica y otra. La ventaja que tienen los modelos de simulación, es que se obtienen valores óptimos de las variables de control, mientras que la técnica de simulación es una técnica de prueba y error, y no es muy confiable que llegue a lo más óptimo. No obstante, el proceso de optimización es un proceso complicado, su nivel de detalle es mucho menor que el que se puede conseguir en un modelo de simulación. Según lo anterior es conveniente utilizar ambas técnicas, aprovechando las ventajas de cada una. Así los modelos de optimización pueden ser utilizados con concepciones simplificadas del sistema para filtrar alternativas que después pueden ser evaluadas con más detalle con los modelos de simulación.

4.2.3 Simulación de Sistemas de Recursos Hidráulicos.

Los modelos de simulación pueden, en una rápida clasificación, estar basados en:

- Procedimientos secuenciales de simulación. Tantean la satisfacción período a período, de las demandas de cada embalse, comenzando por los situados aguas arriba y teniendo en cuenta que todos deben vaciarse a un ritmo compatible con su capacidad, tratando de mantener un equilibrio en el grado de llenado de todo el sistema (regla del espacio vacío o similares). Toman decisiones conjuntas cuando varios embalses abastecen una demanda única. Generalmente, dividen la capacidad de los embalses en fracciones, tomando las decisiones de desembalse en función de las demandas actuales y previsibles y su prioridad, el nivel del

embalse actual, las limitaciones de los elementos del sistema y, en ocasiones, las aportaciones previsibles.

- Procedimientos de simulación basados algoritmos de optimización. Resuelven por procedimientos de optimización, generalmente basados en la teoría del grafo, en un solo tanteo para cada período de tiempo, el conjunto de relaciones entre embalses, recursos y demandas con las reglas de optimización especificadas, teniendo en cuenta las restricciones a que está sometido cada elemento del sistema, como en el caso de los procedimientos secuenciales.
- Procedimientos de optimización. Obtienen por métodos de investigación operativa el valor óptimo de la función objetivo, y por tanto la estrategia óptima de explotación, para el período de tiempo que representan las series de aportaciones ensayadas, teniendo en cuenta las restricciones asociadas a cada una de las variables. Suelen emplearse métodos de programación lineal programación dinámica.
- Procedimientos mixtos simulación-optimización. Tratan de combinar lo mejor de ambos métodos. En una primera fase, buscan la regla de explotación más ventajosa con la serie de aportaciones que se haya adoptado, utilizando procedimientos clásicos de optimización. En la segunda fase, simulan el comportamiento del sistema intervalo a intervalo cuando se opera con las reglas antes calculadas.

Se han escrito cientos de programas con el planteamiento hasta ahora expuesto. Pero solo pocos han trascendido a nivel mundial, no necesariamente por la calidad de sus formulaciones sino por la difusión que han tenido y la experiencia que se ha generado con su empleo masivo en casos reales.

Los programas escritos específicamente para un sistema concreto de recursos hidráulicos son muy numerosos. La mayoría adoptan los algoritmos de cálculo de alguno de los programas estándar, y en general incluyen nuevas opciones, no contempladas en aquellos.

Sus principales problemas se resumen en los puntos siguientes:

- La ausencia de difusión y por tanto de usuarios.
- Su ausencia o escasez de instrucciones de usuario, que quedan muchas veces sólo en la mente del programador y convierten a los programas en difíciles e inseguros de aplicar a extraños.
- Su mayor probabilidad para producir errores cuando se emplean opciones múltiples no contempladas en los test de prueba.

Precisamente, el uso intensivo de los programas de gran difusión, se deben las mejoras que sucesivamente han sido introducidas en las nuevas versiones, pudiéndose afirmar:

- En la actualidad, carecen prácticamente de errores importantes, si bien una aseveración de éste tipo nunca es del todo cierta en programas tan complejos.

- Son capaces de simular casi cualquier circunstancia que pudiera pensarse en esquemas de empleo de recursos hidráulicos.

Los programas más conocidos para la simulación y optimización de recursos hídricos que existen en la actualidad son los que a continuación serán descritos en cuanto a sus características, son los siguientes:

- El HecResSim, desarrollado por Hydrologic Engineering Center (HEC), de U. S. Army Corps of Engineers.
- RiverWare, desarrollado por el U. S. Bureau of Reclamation (USBR) y Tennessee Valley Authority (TVA).
- MODSIM, desarrollado por el Departamento de Recursos Hidráulicos de la Colorado State University (EE.UU.).
- AQUATOOL, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, España.
- El modelo WRAP, desarrollado por Texas A&M University.

4.2.3.1 Programa HecResSim

El HecResSim 3.0 es un modelo basado en reglas, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC), del U. S. Army Corps of Engineers. Los predecesores de este programa fueron HEC-3 y HEC-5.

La introducción de datos se realiza a través de un interfaz gráfico, gestionándose con un programa común para la serie HEC (HECDSS).

Se encuentra dividido en tres módulos: Definición de la línea divisoria de agua, red de embalses y simulación. El primero provee al usuario de un entorno de trabajo común para la creación de las cuencas y su aplicación a las modelaciones pertinentes, el segundo permite construir un río esquemáticamente, describiendo los elementos físicos y operacionales; finalmente se ejecuta la simulación y se revisan los resultados.

Hay que destacar que estos módulos permiten presentar sus resultados visualmente en un contexto geo-referenciado con la interacción de los datos asociados.

El intervalo de tiempo en la serie de resultados varía desde 15 minutos hasta 1 día.

Ha sido utilizado, entre otros casos, para el modelado de las cuencas de los ríos Sacramento y San Joaquín en los Estados Unidos y para modelar los sistemas fluviales de los ríos Tigris y Éufrates (Irak).

4.2.3.2 Programa RiverWare

El modelo RiverWare, desarrollado por el U. S. Bureau of Reclamation (USBR) y Tennessee Valley Authority (TVA), es un modelo híbrido que permite la programación mediante reglas y la programación lineal para la obtención de objetivos (optimización).

Está creado, como el anterior, con el lenguaje de programación C++ orientado a objetos.

Incorpora un gran conjunto de herramientas para la definición de las reglas de funcionamiento del sistema, obtención de resultados, etc. Este modelo, a diferencia de MODSIM, permite definir multitud de elementos diferentes constitutivos del sistema hidráulico (tuberías, canales, trasvases bidireccionales, embalses, aprovechamientos hidroeléctricos, etc.). Con RiverWare se pueden obtener diversos niveles de aproximación a un problema concreto en función del alcance de los datos aportados al modelo.

El usuario puede seleccionar el intervalo de cálculo, en un rango entre 1 hora y 1 año.

Posee un entorno gráfico muy potente que incluye un editor a partir del cual el usuario puede crear restricciones y expresiones en el lenguaje original.

Como factor añadido, permite la posibilidad de modelar mediante sus propias subrutinas de cálculo la calidad de las aguas, trabajando con sedimentos y oxígeno disuelto.

Ha sido aplicado en diversas cuencas de los Estados Unidos, como en la del Río Grande, Yakima (Estado de Washington) y la cuenca del Truckee (California -Nevada).

4.2.3.3 Programa MODSIM.

El MODSIM es un programa desarrollado en la Universidad de Colorado que se basa, en un algoritmo de solución de gráficos basados en programación lineal (out-of-kilter).

El sistema hidráulico a analizar se define en MODSIM mediante cuatro tipos de elementos: nodos sin almacenamiento (puntos de cálculo del sistema), nodos de demanda (tomas de abastecimiento), embalses y las conexiones (conductos y canales naturales) entre los anteriores. A través de estos nodos y de la variación de sus características pueden modelarse sistemas complejos, obteniéndose resultados a nivel diario, semanal y mensual.

El programa permite, mediante un entorno gráfico, establecer prioridades en la satisfacción de las demandas, en el sentido de los flujos hídricos o en la gestión de los embalses, entre otras. Esto posibilita su utilización en el estudio de trasvases entre cuencas.

La interfaz operativa es sencilla e intuitiva, lo que facilita la creación de la topología del sistema. Además, el modelo presenta muchas posibilidades de visualización de los resultados optimizados en forma gráfica y la posibilidad de una mayor personalización de las reglas de funcionamiento del sistema mediante la creación de scripts.

Por otra parte, su compatibilidad con otros programas permite su empleo en el estudio de la influencia en la gestión de aspectos tales como la calidad de aguas (mediante el modelo QUAL2E) o el tratamiento de la escorrentía subterránea (a través del USGS MODFLOW).

Las características principales del modelo son las siguientes:

- Trabaja indistintamente a intervalos de tiempo semanal o mensual.
- Si bien no está incluido de momento en el modelo, se pueden tener en cuenta las incertidumbres futuras con una optimización de las reglas de explotación del tipo estocástico.
- La evaporación se calcula de forma iterativa. También puede tener en cuenta pérdidas por filtración.
- Se puede simular la producción hidroeléctrica.
- Las reglas de operación se introducen en forma de curvas, pudiendo definir hasta tres diferentes períodos (seco, medio y húmedo) en función de los volúmenes almacenados y de las aportaciones.
- Incorpora un procedimiento de entrada interactiva de datos y produce gráficos.
- No considera los retornos de agua al sistema procedentes de las demandas.

El MODSIM ha sido aplicado en grandes sistemas fluviales, sirva como ejemplo su aplicación en el río Poudre, en el Snake River en Idaho y Wyoming en Estados Unidos, o en el río Piracicaba en Brasil.

4.2.3.4 Programa Aquatool.

Es un programa para simular el funcionamiento de un Sistema de Recursos Hídricos (SRH), desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. Está formado por módulos que permiten considerarlo como un modelo híbrido (similar al RiverWare), en el cual se pueden elegir las opciones capaces de optimizar el sistema o bien evaluarlo mediante reglas.

Los diferentes datos del sistema a modelar se introducen, de forma gráfica, en módulos independientes unos de otros, que son los siguientes: AquiVal, Ecuallizador multiobjetivo, MashWin, OptiWin, SimRisk y SimWin.

Destaca el Ecuallizador multiobjetivo, que es un programa que auxilia a los tomadores de decisiones cuando se enfrentan a problemas multiobjetivo, tales como los que se presentan en gestión de sistemas en cuencas complejas.

El módulo más complejo y desarrollado es el SimWin que modela detalladamente la gestión de un sistema de recursos hídricos. El usuario define los elementos que componen el sistema a representar, la vinculación de los elementos, las características de cada elemento y sus reglas de operación.

Los elementos que admite en el diseño de la cuenca son:

- nudos
- embalses
- conducciones de 5 tipos: impermeables, con pérdidas por filtraciones, conectadas a un acuífero, con caudal determinado por diferencia de cotas, etc.
- demandas consuntivas

- centrales hidroeléctricas
- entradas hidrológicas (aportaciones):
- acuíferos de varios tipos: unicelular, pluricelular, depósito, modelo distribuido mediante autovalores
- elementos de retorno
- recargas artificiales de acuíferos
- bombeos adicionales desde acuíferos
- indicadores de alarma para introducir restricciones en las demandas
- indicadores de grupos de demandas isoprioritarios

Basándose en el anterior, el módulo SimRisk considera el riesgo de sequía. A partir del estado inicial del sistema y de una gran cantidad de series sintéticas de aportaciones determina distintos indicadores del riesgo de sequía, para que el gestor decida si ese riesgo es admisible o, en caso contrario, cuantifique las restricciones a aplicar.

Otra de las características destacables de este modelo es su capacidad para simular el aprovechamiento conjunto de las aguas superficiales y subterráneas de una cuenca, para conseguir un uso más racional del recurso.

El programa permite fácilmente realizar modificaciones en el sistema, tanto incluyendo o eliminando elementos o modificando las características y reglas de operación de los mismos. De esta forma se puede estudiar la respuesta de un SRH frente a posibles modificaciones, respondiendo a la pregunta ¿qué pasaría si...?.

Hay que indicar que los resultados de los diferentes procesos modelados se obtienen a nivel mensual.

El modelo comenzó a desarrollarse en 1982, con el fin de estudiar el sistema Júcar-Turía. Ha sido ampliamente probado en numerosas cuencas de España y el resto del mundo. También ha ido incorporando numerosas mejoras con el paso del tiempo y ha sido aplicado en la gestión de otros ríos como el Guadalquivir y el Tajo.

El programa construye una red de flujo interna, cerrada y conservativa, a partir del sistema diseñado en pantalla por el usuario. Luego minimiza la función objetivo del sistema usando el algoritmo 'out-of-kilter' (o de las desviaciones) en forma iterativa, para poder tener en cuenta procesos no lineales tales como la evaporación de embalses, filtraciones de ríos a acuíferos, etc.

4.2.3.5 Programa WRAP

El modelo WRAP, desarrollado por Water Rights Analysis Package en Texas A&M University, simula mediante reglas la gestión de los recursos hídricos de los sistemas.

La interfaz sólo permite elegir ficheros de datos, lo que supone la introducción de los diferentes elementos del sistema con la discretización de sus características en archivos elaborados.

El modelado puede realizarse a nivel diario, mensual y sub-mensual.

Incorpora la posibilidad de usar derechos de aguas, almacenamiento de embalses, reglas de operación y gestión de agua bajo convenios institucionales, incluso con la opción de modelado de transporte de agua entre cuencas.

Incluye un régimen de prioridades basado en la topología del sistema, lo que supone una cierta capacidad de optimización. Además, puede realizar el análisis de rendimiento-fiability de los resultados.

Hay que destacar en el aspecto negativo, el hecho de no poseer salida gráfica, por lo que todos sus resultados son volcados a ficheros en cuyo tratamiento deben utilizarse otras aplicaciones.

Este modelo ha sido empleado en diversas cuencas en Estados Unidos, entre ellas el Río Grande (EUA), o conocido como río Bravo en México.

4.2.3.6 Otros modelos

Por mencionar algunos otros SAGA, MULINO, WaterWare, RIBASIM, WEAP21, RAISON, ARIANE, REGISPRO.

- **SAGA.** El Sistema de Gobernabilidad del Agua, es un instrumento diseñado para ayudar a establecer en los países, condiciones de gobernabilidad del agua para proveer la información necesaria para el fortalecimiento de las capacidades de gobernabilidad de forma efectiva y eficiente a través del mundo. Elaborado por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP).
- **MULINO** - es un sistema de apoyo de decisión multisectoral, integrado y operacional para el uso sostenible de recursos hídricos en la escala de captación, con un enfoque en el DSS como ayuda de multicriterios de decisión. Puede acomodar un modelo físico de hidrología de cuenca externo al sistema, conectando a través de procedimientos apropiados de entrada-salida.
- **WaterWare.** es un sofisticado recurso hídrico DSS que incluye simulación dinámica de modelos físicos de calidad de agua, distribución, precipitación-escurrimiento superficial, agua subterránea y elementos de manejo de agua, incluyendo la demanda/oferta, el análisis costo-beneficio y el análisis de criterio múltiple. Aunque integre el sistema físico de hidrología con el de manejo, la aplicación del modelo requiere un nivel bastante sofisticado de apoyo de usuario y de hardware.
- **RIBASIM,** es un modelo de Simulación Hidráulico de Cuencas de Delft, es un modelo genérico de planificación de recursos hídricos para la investigación del comportamiento de cuencas hídricas bajo varias condiciones hidrológicas.
- **WEAP21,** es un modelo para el análisis de la demanda y planificación del agua, es un modelo descrito como un conjunto de prioridades de demanda y preferencias de la oferta definidas por el usuario para cada sitio de la demanda utilizado para construir una rutina de optimización que distribuye los suministros disponibles.

- **RAISON**, es un ejemplo de interacción de base de datos, modelos y GIS a través de un sistema inteligente. Es un Sistema Experto en el cual la lógica de inferencia y las técnicas de diseño interactivo se usan para realizar ambas operaciones fundamentales y resolver casos especiales y proveer una arquitectura de programación abierta de base de datos, modelos, GIS y Sistemas Expertos. Las aplicaciones básicas y avanzadas se ilustran mediante dos ejemplos.
- **ARIANE**, es una herramienta para toma de decisiones sustentable en forma inteligente en el proceso de desarrollo de la HidroQuebec. Incluye una guía a los usuarios de los procesos de planificación para la operación plurianual. El Sistema permite monitorear la actualización sistemática y validación de datos, la consistencia de datos, el uso del conocimiento heurístico y la llamada secuencia de modelos matemáticos interdependientes de la Hydro-Quebec (Bakonyi, P. , 1993).
- **REGISPRO** – es un sistema de información para gestión integrada del agua, este sistema consiste en un almacenamiento de datos y una aplicación medioambiental. Tiene funcionalidades para gestión general de datos (adquisición, mantenimiento, selección, salida), además comprende un conjunto de herramientas genéricas para procesar datos espaciales y no espaciales (análisis de mapas, estadísticas, edición de mapas e interpretación, informes) y un conjunto de herramientas para ciertas aplicaciones geocientíficas. El sistema está continuamente en desarrollo en respuesta a las necesidades del mercado.

Haciendo un breve análisis de todos estos modelos computacionales, se concluye que todos estos sistemas tienen objetivos similares, y que todos coinciden en el planteamiento relacionado al sistema biofísico de los factores que delinean la demanda de agua, la disponibilidad de agua y su movimiento a lo largo de las cuencas, así como los factores relacionados al sistema de manejo socioeconómico que delinean la manera en que el agua disponible es almacenada, asignada, regulada y entregada dentro o entre fronteras de cuencas.

4.3 Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD).

4.3.1 Introducción.

La utilización racional del agua implica una administración integral, eficiente, y sostenible del recurso hídrico. Los Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) y las medidas para aliviar sus problemas son cada vez más complejos. Puesto que a efectos de analizar los sistemas de forma particular y de plantear dudas clásicas relacionadas con los usos (demandas) y recursos, así como el impactos del cambios climáticos, será necesario el implementar herramientas avanzadas tecnológicamente.

La principal herramienta utilizada en el análisis de sistemas de recursos hídricos es la simulación matemática, ya que permite obtener una aproximación del comportamiento de un sistema mediante la representación numérica de los aspectos de interés y las propiedades del mismo.

Prácticamente la totalidad de la literatura científica referida a la gestión de recursos hídricos propone, justifica, describe o analiza modelos matemáticos concretos, lo cual demuestra la gran importancia de estos como ayuda en el análisis de recursos hídricos.

Dentro del área de gestión de recursos hídricos, se pueden encontrar modelos orientados a distintos objetivos y que en conjunto permiten el estudio integral de un SRH. Esto es, que para un SAD se deberían considerar todos los modelos que sean necesarios para analizar de manera óptima el SRH.

Es evidente que se ha evolucionado bastante para proyectar los SAD, puesto que presentan múltiples ventajas. También la calidad que tienen ha sido empleada en la creación de diversas herramientas de aplicación como: bases de datos relacionadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de cálculo asistidos por programas interactivos de edición de datos y resultados.

4.3.2 ¿Qué es un SAD (Sistema de Apoyo a la Decisión)?

Un Sistema de Apoyo a la Decisión (conocido también como DSS, del inglés, Decision Support Systems) es un conjunto de herramientas, eficaz, potente, amplia y abierta para uso de todos los organismos o personas interesadas o involucradas en la problemática de la gestión de recursos hídricos. Esto permite que estas personas tomen decisiones más acertadas debido a la amplia y rápida forma de generar escenarios de la misma situación en la cual deben tomar una decisión. Se ha pensado en nuestro país que estas herramientas son costosas o difíciles de desarrollar e implementar. Esto se ha debido a la falta de conocimientos de lo que es un SAD y como se puede implementar con las herramientas existentes. Uno de los objetivos es ayudar a los encargados de la toma de decisiones en su función de encontrar soluciones a la problemática de la administración de los recursos hídricos.

En conclusión, el SAD se confirma y consolida como un instrumento valioso de apoyo, difusión y conocimiento de la información sobre los recursos hídricos, para un eficaz manejo sustentable e integral de los recursos hídricos, en los temas referentes al manejo de la oferta hídrica para aumentar la disponibilidad de agua en el tiempo y en el espacio, la gestión de la demanda para lograr la más alta eficiencia en la utilización del agua, las interacciones sectoriales con las actividades económicas, el equilibrio de la demanda de los diferentes sectores, y la preservación de la integridad de los ecosistemas que dependen del agua y el control de los acuíferos de poca profundidad.

El beneficio principal será que a través del desarrollo del SAD y los sistemas de información y gestión, que forman parte de ésta, las autoridades y organizaciones relacionadas con la administración del agua serán capaces de tomar las decisiones más apropiadas para un uso sostenible y eficiente de los recursos hídricos regionales.

4.3.2.1 Objetivos del SAD

Los objetivos principales del SAD son los siguientes:

- Apoyar (no reemplazar) el juicio humano, de tal modo que el potencial de los procesos del hombre y de la máquina sea utilizado al máximo.
- Crear herramientas de apoyo bajo el control de los usuarios, sin automatizar la totalidad del proceso decisorio predefiniendo objetivos o imponiendo soluciones.
- Ayudar a incorporar la creatividad y el juicio del tomador de decisiones en las fases de formulación del problema, selección de los datos, y generación y evaluación de alternativas.
- Apoyar a los ocupan puestos de responsabilidad en la solución de problemas prácticos no totalmente estructurados y en los que, hallándose presente algún grado de estructura, el juicio sea esencial.

Los objetivos operacionales estarán basados en los siguientes aspectos.

- Evaluar el potencial hídrico.
- Evaluar el estado actual en la gestión del agua.
- Analizar los cambios en el uso del agua vinculados a cambios en la oferta y demanda.
- Promover la creación de una instancia local multisectorial de coordinación y planificación del aprovechamiento de los recursos hídricos.

4.3.2.2 Componentes de un SAD

En este contexto se tomara en cuenta el diseño global de un Sistema de Apoyo a la Decisión constituida por los siguientes componentes básicos:

- Bases de datos sofisticadas con facilidad de acceso a datos internos y externos, información y conocimiento,
- Base de modelos, funciones de modelización accesibles mediante un sistema de manejo de los modelos,
- El generador de diálogo(o interfaz con el usuario), interfaz de usuario de fácil manejo diseñada para permitir consultas interactivas, elaboración de informes y funciones gráficas.
- El Tomador de decisiones.

4.3.2.3 Características y capacidades del SAD

En general los SAD tienen las siguientes características:

- Se enfocan en procesos de decisión y no en procesamiento de base de datos.
- Se implantan y modifican rápidamente.

- Suelen ser contruidos por los propios usuarios utilizando herramientas muy difundidas, como son las planillas electrónicas (Excel, Lotus).
- Aportan información útil para la toma de decisiones

Las capacidades del SAD se describen a continuación:

- Proveer apoyo en situaciones semi-estructurales y no estructurales, incluye juicio humano e información computarizada,
- Apoyo para varios niveles administrativos,
- Apoyo para individuos y grupos,
- Apoyo a decisiones interdependientes y/o secuenciales,
- Apoyo a todas las fases del proceso de decisión,
- Apoyo a la variedad de procesos de la elaboración de decisión y estilos,
- Son adaptables,
- Tiene una interface amigable de usuario,
- Su meta es mejorar la eficiencia de la elaboración de una decisión,
- Los usuarios finales pueden operar sistemas simples,
- Utiliza modelos,
- Provee acceso a una variedad de fuentes de datos formatos y tipos de información para mejorar las decisiones.

4.3.2.4 Metodología para el desarrollo del SAD

El desarrollo completo del SAD, desde el reconocimiento de la necesidad que va a satisfacer hasta el funcionamiento computadorizado óptimo, atraviesa distintas etapas que conforman lo que se denomina el ciclo de vida de un sistema. Estas etapas estarán de acuerdo al enfoque metodológico en el que se analizaran las siguientes fases: Necesidad, Planificación, Análisis, Diseño, Implementación, prototipo y el Sistema en sí. (Fig. 4.1).

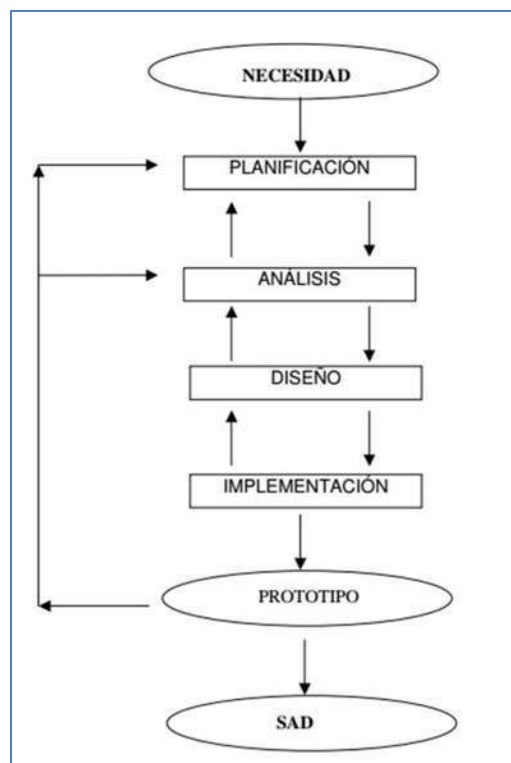


Fig. 4.1 Estructura para el desarrollo de un Sistema de Apoyo a la Decisión.

- a) **Necesidad.** En esta fase se define la visión del sistema, se establecerá el alcance del proyecto y se tomará la decisión de comenzar con el mismo.
- b) **Planificación.** La planificación del SAD será abordado de acuerdo a las experiencias y lecciones aprendidas dentro de la problemática de la gestión integral de los recursos hídricos, basada en los principios de la institucionalidad, la gobernabilidad del agua, el sistema de financiamiento, políticas, legislación y la participación pública.
- c) **Análisis.** El propósito de esta fase es, analizar el sistema en busca una solución, definir la estructura preliminar del sistema, identificar los factores de riesgo del proyecto y por último, elaborar un plan detallado del mismo considerando atributos y posibilidades de eficiencia, costos de instalación, infraestructura material y humana necesaria.
- d) **Diseño del SAD.** La fase del Diseño consiste en la elaboración del SAD y de los productos de apoyo necesarios, tales como los componentes básicos: El sistema de administración de bases de datos, el sistema de administración de modelos, el generador de diálogo (interfaz) y el tomador de decisiones. En esta fase también define la estructura del sistema y sus especificaciones técnicas.
- e) **Implementación.** Para la implementación se considerarán los siguientes aspectos: Motivaciones para la implementación, ventajas y desventajas, riesgos de la implementación, atributos y posibilidades de eficiencia, costos de instalación, infraestructura material y humana necesaria

- f) **Prototipo.** Esta es una fase de transición en la cual el SAD diseñado y consolidado se entrega a los usuarios. Esta fase incluye actividades de. Instalación, configuración, capacitación de los usuarios, pruebas y ajustes, correcciones, etc., y finaliza cuando los usuarios están satisfechos con el sistema, lo cual suele implicar una aceptación formal por parte de los mismos.
- g) **Presentación del SAD.** Para la presentación del SAD se planificara un Taller de divulgación, a efectos de intercambiar opiniones acerca del SAD.

4.3.2.5 Planeamiento para la Implementación del SAD.

La implementación y la puesta en marcha del SAD se realizarán mediante la identificación de las siguientes tareas principales

- La recolección de un conjunto de datos (metadatos) útiles para la identificación y selección de los procesos,
- Disponer de una visión detallada de la infraestructura hidrológica y para la gestión de los recursos hídricos en la Cuenca.
- El desarrollo de un modelo conceptual de gerencia de datos, planteado ya sea desde un sencillo análisis utilizando herramientas muy difundidas, como son las planillas electrónicas (Excel), hasta un modelo matemático o estadístico complejo de análisis que requiere un complejo programa de base matemática, pero que finalmente requiera del juicio del tomador de decisiones.
- Definir modelos, dentro de esta área se ven temas como determinar los de sistemas eficientes de almacenamiento de información sobre el agua en una cuenca (Módulos de restitución, actualización y validación de datos) y los modelos con sus respectivos módulos (simulación de los procesos de precipitación-escorrentía y transporte, simulación de la gestión integral de cuencas incluyendo criterios cualitativos, y análisis económicos de la gestión, etc.).
- Establecer el generador de diálogo (interfaz con el usuario).

4.3.2.6 Ventajas y desventajas de los SAD

Entre las ventajas de los SAD podemos citar:

- Evitan el esfuerzo de desarrollo permitiendo reducir los tiempos.
- Estos sistemas se encuentran ya probados, lo cual brinda seguridad en cuanto a su funcionamiento.
- Los proveedores actualizan constantemente los sistemas, lo cual permite evitar esfuerzos de actualizaciones,
- Existe una red de soporte de proveedores y consultores, disponibles en caso de problemas o necesidades.
- Incorporan las mejores prácticas..
- Están integrados, pero a su vez están formados por módulos, lo cual permite ajustarse a las necesidades de cada usuario.

Entre las desventajas de los SAD, podemos citar:

- Requieren una compleja tarea de personalización del software según las necesidades del usuario.
- Se genera una importante dependencia del proveedor.
- Exigen un alto esfuerzo y costo de implementación.
- No todos los módulos del producto son satisfactorios.
- Exigen una mayor demanda de recursos de computación.
- Implican una obsolescencia forzada del producto, es decir, los proveedores actualizan los sistemas constantemente, y van discontinuando versiones anteriores, lo cual obliga a los usuarios a comprar dichas actualizaciones

4.3.3 Análisis de SAD

Es importante destacar que la infraestructura material del SAD dependerá de la estructuración de los componentes del SAD, es decir de la base de datos, la base de los modelos, el generador de interfaz y el tomador de decisiones, además de la cantidad de desafíos técnicos que se requieren en la implementación de dichos sistemas.

En este contexto se analizaron varios Sistemas de Apoyo a la Decisión, con diferentes utilidades, por existir una gran cantidad de estos, se describieron solo algunos de amplia difusión. Como por ejemplo: HecResSim, RiverWare™ DSS, AQUATOOL, SAGA, MODSIM DSS, MULINO DSS, WaterWare, RIBASIM, WEAP21 DSS, RAISON, ARIANE, REGISPRO, WRAP, etc.

Estos sistemas están concebidos para crear herramientas:

- De soporte del Sistema de información hidrológica y meteorológica,
- De ayuda para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos,
- De planificación (a largo plazo),
- Para la toma de decisiones para aquellos que tienen responsabilidades en sector hídrico
- Para tener una visión comparativa del el estado de la gobernabilidad del agua en los diferentes países,
- Para acceder a la información sobre el agua existente en los países,
- Un recordatorio de las responsabilidades no cumplidas.

4.3.3.1 Sub-sistema de administración de datos

Este subsistema se refiere a un archivo especializado en forma de “base de datos” planteada generalmente como una data warehouse, donde la información debe estar cuidadosamente documentada y fácil de acceder, la complejidad dificultará solo el acceso de los usuarios.

Existen una infinidad de estos sistemas de manejo de bases de datos, tanto para datos climáticos como hidrológicos, o mixtos, también los hay combinados con parámetros relacionados con la agricultura, pronósticos, gestión de los recursos hídricos, políticas, etc.

También se deben analizar algunos sistemas de bases de datos, varios empleados por organismos relacionados con la administración de los recursos hídricos y algunos productos desarrollados en algunos servicios hidrometeorológicos.

La OMM (Organización Meteorológica Mundial) a través de su programa HOMS (Sistema de Hidrología Operativa) recomienda una serie de programas informáticos, de los cuales los más relevantes son: HYDATA, DAWACO, HYSDIS, TIDEDA, HYQUAL, CLICOM, HYDRACCESS, GOFUVI, SISMET, ORACLE.

Todos estos sistemas de manejo de bases de datos obedecen principalmente a las necesidades y capacidad económica de los usuarios que las implementan

4.3.3.2 Sub-sistema de administración de modelos.

El análisis de este sub-sistema, se enfoca con mayor atención en el modelado de manejo de recursos hídricos, que pueden ser utilizados para investigar asuntos de oferta y demanda de agua sobre la planificación a futuro, coherente con las proyecciones del cambio climático.

Existen una infinidad de modelos relacionados con el manejo integral de agua que han sido enfocados en la comprensión de cómo fluye el agua a través de las cuencas en respuesta a los eventos hidrológicos (por ejemplo, simulaciones hidrológicas y/o hidráulicas) o de cómo distribuir el agua que queda disponible en respuesta a tales eventos (por ejemplo, simulaciones sobre manejo de recursos hídricos).

La lista de estos modelos es demasiado larga para ser mencionada en detalle, es por eso que solo se mencionan algunos, unos relacionados con en el campo de la gestión de sistemas hídricos, (SWAT, MIKE SHE, HEC (HSM), HYMOS, HIDRO-GEST, ECOGES, MevalGes, ActVal, ILWIS, IRAS, etc.); otros sobre el uso del agua en la agricultura, como los recomendados por la FAO (AQUASTAT, CROPWAT, CLIMWAT, GTOS, KIMS, METART, SICIIV, SMIA, etc.); y lo denominados modelos hidrodinámicos, (DELFT3D de Delft, MIKE21 y el MIKE3, HEC-RAS, PATRICAL, GESCAL, MAGIC, Visual Modflow v.3.0, SIMED, etc.) muy importantes por su aplicación.

Este tipo de herramientas de modelado hidrológico simulan los procesos físicos, incluyendo precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, infiltración y flujo de agua subterránea. En sistemas manejados, también se justifica la operación de estructuras hidráulicas tales como diques y desvíos así como los factores institucionales que gobiernan la asignación del agua entre demandas competitivas, incluyendo la demanda de consumo para el abastecimiento de agua agrícola y urbana, y la demanda de no-consumo para la generación de energía hidráulica o la protección de ecosistemas.

En resumen, las tareas y propósitos de los modelos de esta clase están delineadas en general por los siguientes aspectos:

- Son herramientas de ayuda para la planificación y gestión de cuencas hidrográficas,
- Son herramientas de soporte de información hidrológica,
- Efectúan una planificación (a largo plazo): Evaluación de recursos hídricos, evaluación de rendimiento de nuevas infraestructuras (presas, canales, etc.), análisis de diferentes alternativas de actuación (nuevos usos del agua), valoración económica de la gestión (análisis económico de la gestión, valoración del coste del recurso), evaluación ecológica y de calidad del agua a nivel de cuenca (efecto de diferentes alternativas de gestión sobre la calidad), y diseño de reglas de operación de embalses, acuíferos, demandas, canales, etc.
- Realizan una Gestión relacionada con la evaluación del riesgo asociado a la gestión (simulación de la gestión integral de cuencas incluyendo criterios cualitativos).

4.4 Sistema de Apoyo a la Decisión AQUATOOL

Cabe mencionar que para desarrollar un DSS de manera eficiente, la persona en cargada de simular debe conocer a detalle la situación que se pretende simular. Estas personas se encargan de desarrollar la parte técnica. Por lo tanto, un DSS es una herramienta importante, que nos permite agilizar y mejorar la toma de decisiones en una situación particular.

Los sistemas computacionales desarrollados para la problemática de la hidrología y de la gestión de recursos hídricos han ido a más en los últimos años. Estos sistemas apoyan a los expertos en el diseño, planificación y explotación del sistema hídrico.

AQUATOOL: (Andreu et al, 1996). Desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia. Actualmente denominado por su interfaz AQUATOOLDMA, es un nuevo editor de grafos para simulación de cuencas con el que se pretende sustituir los anteriores editores (SIMWIN y OPTIWIN) proporcionando a su vez soporte a otros módulos de simulación. AQUATOOLDMA también pretende dar soporte a los trabajos de simulación de cuencas relacionados con el desarrollo de los planes hidrológicos de 2009, con este propósito proporciona ya soporte para los modelos de simulación conjunta de la gestión de cuencas SIMGES y de simulación de la calidad de agua a escala de cuenca GESCAL. Asimismo incluye un visor de capas GIS con el que se puede establecer una relación directa entre elementos del grafo de la simulación y las “masas de agua” incluidas en las capas GIS cargadas.

En términos generales AQUATOOLDMA incluye las mismas utilidades de diseño que SIMWIN. Las fichas de edición de elementos permiten editar los datos para el modelo SIMGES y para el modelo GESCAL. Todas las simulaciones/escenarios de un mismo modelo pueden mantenerse en un único archivo de datos. Esto permitirá el manejo en paralelo de los distintos escenarios que se estudian sobre un mismo sistema. Los datos

se guardan en un archivo de base de datos con el que interactúa el programa, y los archivos de datos y resultados de las simulaciones se incluyen en una subcarpeta de la que contiene al archivo principal.

AQUATOOL es un entorno de desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (SSD) para planificación y gestión de cuencas o de sistemas de recursos hídricos. Como SSD proporciona recursos para ayudar al análisis de diversos problemas relacionados con la gestión del agua.

Además, AQUATOOL es una línea de investigación en continuo desarrollo, por lo que además de las conocidas herramientas de análisis de la gestión de cuencas, también proporciona otras herramientas que facilitan el desarrollo de trabajos relacionados. Estas herramientas pueden ser módulos de aplicación general que en el futuro estarán disponibles, o desarrollos específicos requeridos por un cliente que no son generalizables.

La valiosa experiencia obtenida hasta ahora con dicho SSD en su aplicación a casos reales de planificación en cuencas españolas (Júcar, Segura, Tajo,...) y extranjeras (Argentina, Brasil, Italia, etc.) aseguran la robustez del mismo y su flexibilidad para modelar gran variedad de sistemas.

4.4.1 Módulos de AQUATOOLDMA

El sistema consta de una serie de módulos y estos están integrados en un sistema único en el que la unidad de control del usuario permite la definición gráfica del esquema del sistema, el control de las bases de datos, la utilización de los módulos mencionados y el análisis gráfico de los resultados. Estas capacidades pueden ser utilizadas en un sistema de recursos hidráulicos para:

- a. Filtrar alternativas de diseño mediante el módulo de optimización.
- b. Filtrar alternativas de gestión mediante el uso del módulo de optimización obteniendo criterios de operación a partir del análisis de los resultados óptimos.
- c. Comprobar y refinar las alternativas filtradas mediante el uso del módulo de simulación.
- d. Llevar a cabo análisis de sensibilidad comparando los resultados después de cambios en el diseño o en las reglas de operación.
- e. Llevar a cabo análisis de riesgo simulando y/u optimizando con diferentes series sintéticas hidrológicas (análisis de Monte-Carlo).
- f. Ganar conocimiento del sistema en los aspectos físicos y de gestión. Y también ganar en el aspecto de organización de datos.
- g. Utilizar el módulo una vez que se implanta una alternativa como una ayuda en la operación del sistema de recursos hidráulicos (off-line), principalmente para reparto de recursos entre demandas conflictivas, y para estudiar impactos de cambios en el sistema.
- h. Utilizar la propia unidad de control para la localización georeferenciada de los elementos de los esquemas, traslado de datos entre los módulos de simulación y

de optimización, exportación de la información gráfica a formatos usuales de tratamiento gráfico.

La interfaz de usuario (AQUATOOLDMA) facilita el diseño de esquemas de trabajo y la gestión de datos y resultados. Dentro de esta interfaz se incluyen diversos módulos que ayudan a la planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos (Fig. 4.2). Estos son los siguientes:

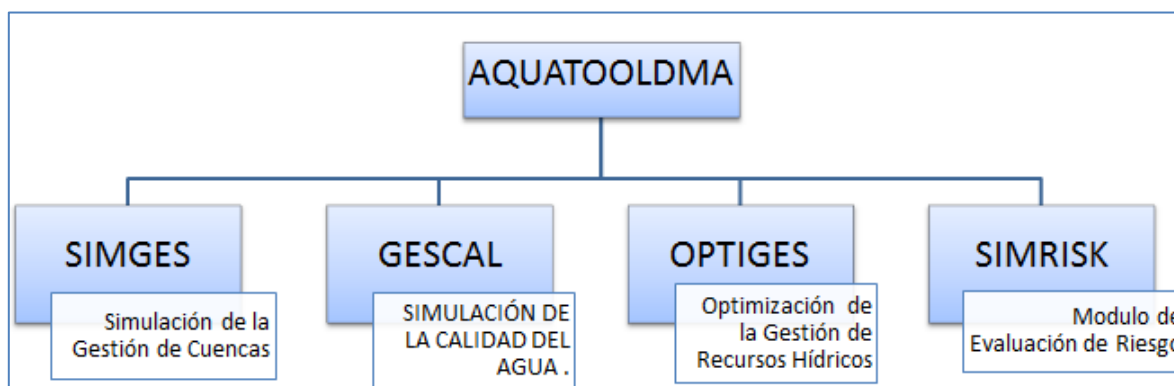


Fig. 4.2 Estructura general del AquaToolDMA

A continuación se describe brevemente cada módulo:

El módulo **SIMGES** es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos. La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce con el detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance.

Los acuíferos y las relaciones río-acuífero se simulan con modelos unicelulares, con modelos pluricelulares, o utilizando el método de los autovalores mediante modelos distribuidos en los que se considera la variación espacial de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos. El modelo SIMGES también considera los retornos a las aguas superficiales y los que se infiltran en los acuíferos y tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se simula mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos

ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volumen objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica. Además, esta optimización se completa con un proceso iterativo de llamadas al algoritmo de optimización lineal, lo que permite mejorar la calidad de la simulación en procesos no lineales como filtraciones, evaporaciones y relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.

El módulo **GESCAL** fue desarrollado para la evaluación de la calidad del agua a nivel de cuenca. Para ello incluye el cálculo de todos los procesos de modificación de la calidad del agua tanto en tramos de río como en embalses y aplica este cálculo a cada elemento del esquema de la cuenca elaborado para Simges conectándolos entre ellos según el flujo de la cuenca. Aplicándolo a diferentes alternativas de decisión en la gestión de la cuenca permite evaluar las consecuencias en materia de calidad del agua que tiene para toda la cuenca cualquier decisión que se plantee.

El módulo **OPTIGES**, resuelve el problema del reparto mensual del agua de una cuenca. Para ello, realiza la optimización de este reparto para un periodo de tiempo de uno o varios años. De este modo calcula el reparto óptimo del recurso en cada periodo sin apenas necesidad de datos, prácticamente solo la descripción física de la cuenca: conexiones, embalses, y demandas. Esto supone una gran ventaja para su uso en sistemas de los que se dispone de reducida información o cuando se pretende obtener conclusiones generales a escala anual. Por el contrario, la gestión mensual que simula no es directamente comparable a la realidad, ya que en la realidad no se conoce con antelación cuales van a ser los recursos en el futuro. Por ello requiere del usuario un esfuerzo adicional de interpretación de resultados para traducirlos a conclusiones útiles para la gestión. Una manera eficaz de validar esta interpretación es tratarla y perfeccionarla con el uso del módulo SIMGES.

El módulo **SIMRISK** ha sido diseñado para su uso en gestión de cuencas a medio plazo, para la evaluación de riesgos en la gestión. Realiza la simulación de la gestión del sistema para una situación inicial dada de reservas en embalses y en acuíferos y utiliza como datos para el cálculo múltiples escenarios de aportaciones futuras de longitud uno o varios años. Con los resultados de todas las simulaciones calcula estadísticos de probabilidad de estado del sistema en cada mes del periodo simulado, lo que puede utilizarse como estimación probable de la situación a final de la presente campaña y después de dos o más años hidrológicos. Ha sido confeccionado para utilizar los modelos calibrados con SIMGES, con lo que cada una de las simulaciones se realiza exactamente igual que se haría en SIMGES, incluso para la edición de datos se utiliza el mismo interface de usuario (AQUATOOLDMA) que se utiliza para SIMGES.

4.4.2 Otros programas auxiliares de AQUATOOLDMA

El programa **EVALHID** (EVALuación de los recursos HÍDricos) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida.

El módulo **CAUDECO** ha sido diseñado para la simulación de la evolución de indicadores biológicos derivada de los resultados de la gestión obtenidos con SIMGES. Su uso recomendado sería como complemento de simges para la evaluación de del impacto sobre los usos del agua de diferentes alternativas de implantación de caudales mínimos en ríos.

El módulo **AQUIVAL** ha sido desarrollado con el propósito de ayudar al usuario en la elaboración de un modelo de simulación de acuíferos por el método de los autovalores.

La principal utilidad de este modelo es la de producir los datos del modelo del acuífero en autovalores requeridos por el programa SIMGES para su simulación dentro de un modelo de uso conjunto. Aquival ayuda al usuario en la modelización de acuíferos por el método de los autovalores facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico.

La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizados. Esto lo hace idóneo para incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de simulación.

Actualmente se está trabajando en una nueva versión Aquival2 en que se ha reescrito completamente el código, ampliando el número de celdas que puede calcular, el cálculo de modelos multicapa y la simulación de no linealidades como la conexión con río intermitente y manantial o dren. Esta nueva versión solo incluye los módulos de cálculo y ha sido diseñada para interactuar con el software de modelación de acuíferos SMAA.

El módulo **MASHWIN** se utiliza para el análisis de series históricas de aportaciones y la formulación de modelos estocásticos para la generación de series. Su principal utilidad está como complemento del módulo SIMRISK, para producir los modelos estocásticos que utilizaría SIMRISK para la generación de series de aportaciones futuras condicionadas por la información reciente.

El módulo **EVALGES** de evaluación económica de la gestión se ha desarrollado con el propósito de disponer de una herramienta de ayuda en los estudios de coste de las medidas a adoptar en una cuenca. Este módulo permite asociar a cada elemento del modelo de simulación SIMGES una curva coste – caudal que se utiliza para calcular una función económica de todo el sistema. Mediante la simulación de la gestión para las diferentes medidas a adoptar se puede obtener las diferentes funciones económicas de la

cuenca y se puede obtener información sobre los costes añadidos al sistema por cada una de las medidas.

También los programadores de Aquatool están trabajando en nuevos proyectos de desarrollo como los siguientes:

- Un nuevo interface mejorado que pueda sustituir al actual y que entre otras mejoras incluirá el manejo de los mapas del esquema en soporte GIS.
- Un módulo de simulación que permita calcular en la escala temporal diaria.
- Una nueva versión de OPTIGES (3.0) que permitirá simular acuíferos y su relación con las aguas superficiales.

4.5 Reglas de operación para un Sistema de Recursos Hídricos (SRH)

Al tratar cualquier aspecto relacionado con SRH, es muy importante señalar que para lograr una gestión eficiente de los mismos, debemos considerar las reglas de operación de estos como un elemento fundamental, ya que contribuyen de manera determinante a controlar e incluso a mitigar los efectos de la naturaleza aleatoria (sequías, fuertes lluvias).

Se entiende por sistemas de recursos hídricos sostenibles aquellos que se diseñan y gestionan para contribuir plenamente, ahora y en el futuro a los objetivos de la sociedad, preservando su integridad hidrológica y medioambiental, lo cual se logra en una perspectiva a largo plazo, dentro de la cual una de las consideraciones más importantes es la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre. Lo cual, conduce a la necesidad de una gestión eficiente de los SRH, cuya importancia será cada vez mayor, ya que la cantidad de agua en la tierra es constante y la población y sus demandas son crecientes.

En conclusión, las máximas preocupaciones que hay actualmente en materia de recursos hídricos se fundamentan en el aumento de la demanda causado por el crecimiento de la población combinado con la necesidad de evolución basada en un desarrollo sostenible.

El análisis de sistemas resulta particularmente útil cuando se trata de establecer la forma en que debe usarse un recurso escaso, gracias a que su aplicación permite entender mejor el sistema y sus relaciones internas, ampliar la información básica que se tiene de él, y predecir las posibles consecuencias de las distintas alternativas.

Diversos autores enlazan la sostenibilidad de los recursos con la evaluación del riesgo y la incertidumbre de los procesos hidrológicos. Todo trabajo de análisis requiere realizar dos tareas básicas; la preparación y planeación de lo que se va a hacer, y posteriormente, poner en práctica lo planeado. En la gestión de SRH esta distinción sigue siendo válida, en la incertidumbre de cantidad de las aportaciones futuras.

Dentro de la planeación podemos incluir todos los trabajos orientados a definir el propio sistema, infraestructuras, concesiones, garantías y también los estudios que proporcionan

las reglas de operación que delimitan las decisiones a tomar durante la operación del sistema. Las reglas de operación en general persiguen la mejora en el uso de los recursos del sistema; teniendo como objetivo la reducción de los impactos causados por las sequías propiciadas por el cambio climático. La planeación y la operación de sistemas necesariamente deben estar muy vinculadas ya que el desarrollo de reglas de operación debe contar siempre con los intereses y procedimientos implicados en la gestión.

Las sequías son un fenómeno complejo y difícil de identificar, se puede decir que una sequía se da en un periodo de tiempo y una zona geográfica en que se sufre una escasez de agua en relación con los volúmenes normales.

Es evidente pues, que un SRH en estado de sequía sufre impactos de diversos tipos (medioambiental, sociopolítico, económico, etc.), esto ha creado la necesidad de adoptar medidas de mitigación de esos efectos, que tienen como finalidad reducir los daños y las pérdidas económicas asociadas a ellos. Como ejemplo de medidas preventivas podemos mencionar las siguientes, trasvases entre cuencas, uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales, programación de reducciones en el suministro, reciclaje de aguas residuales, desalinización de agua de mar y explotación alternativa de fuentes subterráneas, entre otras. Así mismo, las medidas correctivas están casi siempre orientadas a hacer ajustes en el suministro o en la demanda. Es por ello, que se debe pensar en que cualquier estrategia que se tenga que tomar en alguna de esas direcciones, tenga que pasar en primera instancia por la evaluación del comportamiento del SRH en estudio.

Las reglas de operación de SRH son las herramientas que sirven de guía para la toma de decisiones durante la operación del sistema. El uso de una regla u otra, o de ninguna regla, es determinante para el desarrollo y rendimiento del sistema; un mismo sistema de recursos hídricos, con diferentes criterios de gestión, puede dar rendimientos muy diferentes.

4.5.1 Reglas de operación genéricas

La regla más sencilla, y probablemente la más utilizada en la práctica, es la regla de operación normal o estándar, que se representa en la Fig. 4.3y en la Ecuación 2.1; consiste en suministrar la totalidad de la demanda mientras se dispone de agua y toda el agua disponible cuando su cantidad es inferior a la demanda.

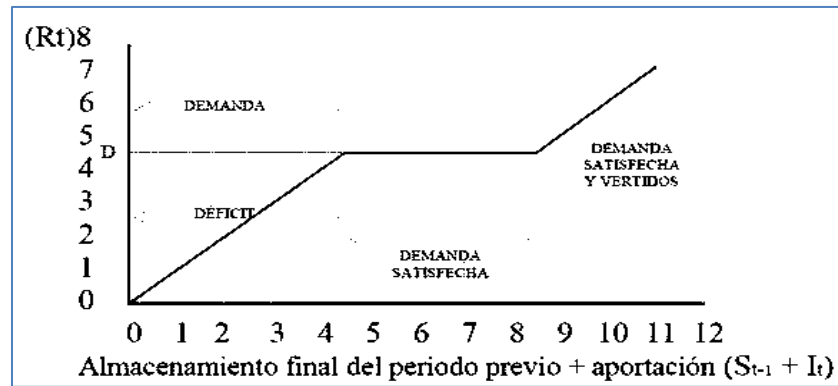


Fig. 4.3 Regla de Operación Normal

$$R_t = S_{t-1} + I_t \quad \text{Sí} \quad S_{t-1} + I_t \leq D_t$$

$$R_t = D_t \quad \text{Sí} \quad D_t \leq S_{t-1} + I_t \leq C$$

$$R_t = S_{t-1} + I_t - C \quad \text{Sí} \quad S_{t-1} + I_t - D_t > C$$

Ecuación 2.1

Dónde:

R_t = Sueltas de Embalse durante el periodo t ,
 S_t = Volumen Almacenado en el Embalse al Final del periodo t ,
 I_t = Entradas durante el periodo t ,
 D_t = Demanda en el periodo t ,
 C = Capacidad del embalse.

Esta es una regla determinista, y además no es la más apropiada para sistemas habituales en los que las pérdidas ocasionadas por fallos no son lineales con respecto a la cuantía del déficit. Si se quieren disminuir los efectos negativos de grandes déficit, la regla se puede modificar con la definición de indicadores de alarma (por ejemplo, un volumen crítico de embalse) y el consiguiente establecimiento de restricciones. La Fig. 4.4 y la Ecuación 2.2 muestran un ejemplo de reglas de operación con restricciones.

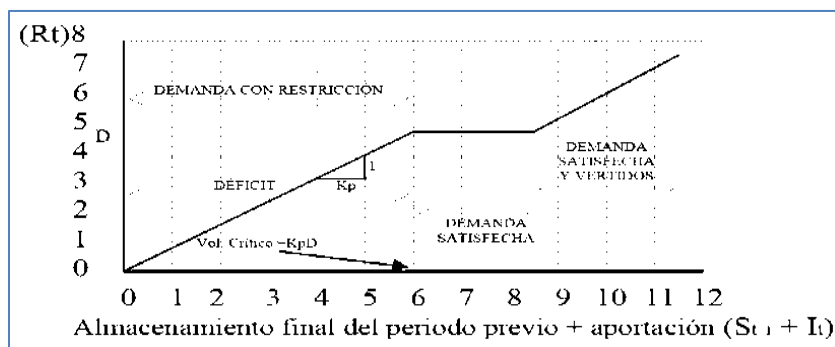


Fig. 4.4 Regla con restricción anticipada.

$$\begin{aligned}
 R_t &= \frac{1}{Kp} (S_{t-1} + I_t) \quad \text{si} \quad S_{t-1} + I_t < Kp \cdot D_t \\
 R_t &= D_t \quad \text{si} \quad Kp \cdot D_t \leq S_{t-1} + I_t \leq C \\
 R_t &= S_{t-1} + I_t - C \quad \text{si} \quad S_{t-1} + I_t - D_t > C
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} R_t &= \frac{1}{Kp} (S_{t-1} + I_t) \\ R_t &= D_t \\ R_t &= S_{t-1} + I_t - C \end{aligned}} \right\} \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

Kp = Pendiente del tramo con restricción

El resto de variables son las mismas que en la Ecuación 2.1

En la práctica, es más realista la definición de escalones en las restricciones, que consiste en la definición de intervalos de volumen embalsado en los que el valor de la restricción es el mismo (Fig. 4.5). Cabe mencionar que este método es muy utilizado en la práctica, porque resulta mucho más comprensible y facilita el diálogo con los usuarios.

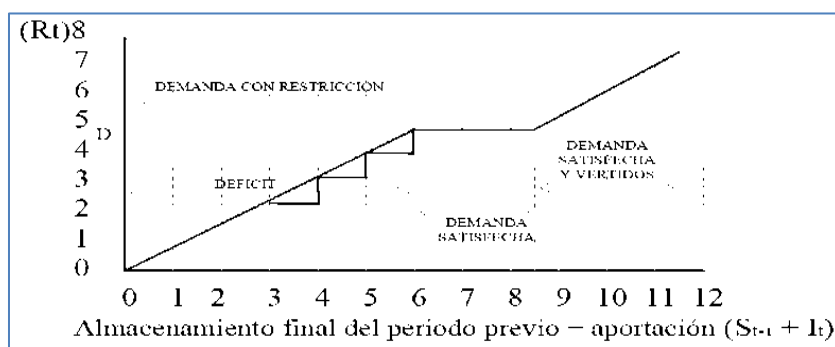


Fig. 4.5 Regla de operación escalonada.

La definición de este tipo de reglas de operación requiere dar respuesta a más preguntas que las anteriores, como son:

- ¿Cuántos escalones se definen?
- Y para cada escalón:
 - ¿Cuándo se comienza la restricción?

- ¿Cuánta es la restricción adecuada?

La aplicación de este tipo de reglas es limitada al estar definidas para sistemas con un solo embalse y pocas demandas, aunque muchos casos reales se pueden simplificar para su análisis a un problema de este tipo. Asimismo, en sistemas que emplean más de un embalse puede ser utilizado como fuente para abastecer un mismo uso, la regla no determina cuánta agua se debe extraer de cada fuente de recursos. Para ello, pueden utilizarse reglas que tratan de mantener el mismo porcentaje de espacio vacío en los embalses que pueden ser utilizados en paralelo.

Desde el punto de vista del análisis de sistemas para el diseño de reglas de operación se pueden citar diversos métodos. Chaturvedi (1987) distingue entre planeación determinista, simulación estocástica, optimización estocástica implícita y optimización estocástica explícita en función del tipo de datos de aportaciones de caudal y del método matemático de análisis utilizado, todos ellos dan lugar a reglas de operación fijas o deterministas.

Para incorporar el riesgo en el proceso de decisión es necesario recurrir a reglas de operación estocásticas. Una de estas reglas se encuentra en la regla de decisión lineal restricción-riesgo (Revelle et al, 1969; Revelle y Gundelach, 1975; Loucks, 1970), y la regla de programación de la garantía restricción-riesgo (Colorni y Fronza, 1976; Simonovic y Marino, 1980). Estas reglas estocásticas se han obtenido en la mayor parte de los casos para sistemas sencillos, con resultando de difícil aplicación en las metodologías que figuran con múltiples fuentes y usos del recurso.

Estas reglas básicas pueden ser introducidas de forma general en modelos de simulación de cuencas de propósito general para poder abordar el problema de definir las reglas de operación para sistemas reales.

También estas reglas pueden dar una gestión eficiente en sistemas sencillos, sin embargo cuando se estudian sistemas reales este tipo de reglas no son suficientes, y es necesario recurrir al uso de modelos matemáticos de simulación que permitan estudiar distintas alternativas de gestión para deducir las más apropiadas.

Velasco y Collado (2000) calculan unas políticas de operación óptimas para algunos embalses en México haciendo uso de un modelo de optimización. Para el diseño de estas adoptan como referencia la situación en el mes de Octubre para la definición de la regla de operación de todo el año. Como indicadores de estado se basan en el volumen almacenado a final de este mes y las aportaciones totales durante el año anterior. Distinguen entre año seco, medio o húmedo según sea la aportación del año anterior; y formulan una regla de sueltas para el año siguiente distinta según sea el año seco, medio o húmedo. La principal limitación de esta técnica es que se aplica a embalses aislados, sin considerar la gestión conjunta de todos los embalses de la cuenca.

Cuando se hace uso de modelos de simulación, estos permiten el tratamiento de un gran volumen de información, lo que hace posible el análisis de SRH mediante métodos

estocásticos, frente a los anteriores que llamaremos métodos deterministas. Los métodos estocásticos permiten realizar estudios de probabilidad y riesgo de fallo en los SRH.

En Sánchez y otros (2001) se propone un método de operación de sistemas basado en la estimación del riesgo, que parte de la generación estocástica de múltiples escenarios hidrológicos basados en la situación presente del sistema, seguida de la simulación de la gestión del sistema para todos los escenarios, lo que da una muestra de múltiples resultados posibles de la gestión que puede ser analizada por métodos estadísticos para deducir el riesgo de fallo del sistema durante los próximos meses. Este método de operación requiere el desarrollo previo de unas reglas de operación basadas en el mismo que permitan interpretar correctamente los estadísticos que se obtienen.

En resumen, se puede encontrar reglas de operación deterministas que definen exactamente la forma de proceder en una situación dada de un sistema. También se pueden encontrar reglas de operación basadas en criterios de riesgo, las cuales en lugar de proponer un modo de operación dan información del riesgo asociado a una decisión determinada. Los sistemas reales requieren para su gestión de un conjunto de reglas de operación, pudiendo mezclarse reglas de operación deterministas con reglas estocásticas.

4.5.2 Concepto de gestión de un Sistema de Recursos Hídricos

Para manejar un SRH en cada unidad de tiempo de decisión (usualmente cada mes) es necesario contestar al menos las siguientes preguntas:

1. ¿Cuánta agua se va a suministrar?
2. ¿Cuál será la asignación del agua entre los diferentes usos?
3. ¿Cuál será la procedencia del agua entre las diferentes fuentes?
4. Igualmente, conviene tener información respondiendo a, ¿qué probabilidades existe para que el funcionamiento sea satisfactorio en periodos próximos?

Para responder estas cuestiones es necesario, como mínimo, partir del conocimiento de la situación actual de las reservas disponibles (estado de almacenamiento en los embalses).

Para definir la gestión de un SRH utilizaremos el concepto de Estrategias de Operación. Éstas, son un conjunto de reglas, procedimientos, criterios, etc., que establecen una relación entre la situación actual de todo el sistema y todas las variables de decisión.

El diseño de estrategias de operación requiere un análisis del sistema que demuestre la idoneidad de las mismas para obtener el mejor rendimiento del sistema en situaciones futuras.

El análisis del sistema puede realizarse con un enfoque determinista y un enfoque estocástico:

- El planteamiento *determinista* consiste en analizar el comportamiento del sistema frente a situaciones hidrológicas concretas (la hidrología histórica), y así, definir una estrategia de operación.
- El planteamiento *estocástico*, establece además unos “procedimientos de operación no deterministas” que proporcionan información acerca de la situación en que quedaría el sistema en términos probabilísticas según cada una de las posibles decisiones que podrían tomarse. concibiendo libertad de decisión al encargado de la gestión.

El uso de reglas de operación deterministas tiene la ventaja de que permite realizar una gestión totalmente objetiva, pero a veces esto es sólo en teoría, pues en la realidad, en situaciones críticas las reglas de operación deterministas no son usadas rigurosamente, sino que la decisión es resultado de un diálogo o negociación más acorde con el tipo de gestión no determinista.

En un sistema de recursos hídricos se puede distinguir entre tres situaciones diferentes, basándose en los problemas que pueden implicar unas estrategias de operación inadecuadas. Estas son:

1. Situación de sequía o riesgo de sequía,
2. Situación de riesgo de vertidos o alta probabilidad de que se generen excedentes no aprovechables, y
3. Situación intermedia o de tranquilidad.

Situación de riesgo de sequía son estrategias de operación necesarias, encaminadas a la anticipación y la mitigación. Una reducción excesiva del suministro o una anticipación excesiva en la identificación de esta situación implicaría costos innecesarios, impuestos sin verdadera necesidad. De lo contrario, si no son suficientes las medidas de mitigación o no se realizan con bastante anticipación, estas pueden ser improductivas, lo que daría como resultado, unos déficit futuros superiores que influyan en costos más elevados.

Situación de una alta probabilidad de vertidos, las estrategias de operación deben encaminarse al aumento volumétrico del agua empleada. De esta manera se consigue maximizar la rentabilidad del sistema, y aminorar el riesgo en producción de avenidas en el sistema con sus daños asociados.

La delimitación de cada una de estas fases o situaciones no es nada fácil, ya que depende de criterios previos que no pueden ser totalmente objetivos, y además, los resultados dependen de la hidrológica futura, que es desconocida y variable. Para esta delimitación se puede recurrir a criterios rígidos y objetivos, lo que da lugar a las reglas de operación deterministas ya descritas. Y también se puede recurrir al análisis por métodos estadísticos de las consecuencias esperables para las distintas alternativas de decisión consideradas para llegar a una decisión más acorde con los criterios e intereses actuales de todas las partes implicadas, lo que daría lugar a procedimientos de operación estocásticos.

4.5.3 Reglas de Operación Deterministas

En los sistemas reales más complejos, las reglas de operación deterministas dejan de ser tan claras y deben ser estudiadas para su validación. Dicho estudio implica necesariamente el uso de modelos matemáticos.

a) Regla para determinar el volumen del suministro

b) Reglas para la asignación de recursos entre distintos usos

En este punto se revisan los diferentes tipos de uso del agua con el propósito de deducir los criterios básicos a tener en cuenta en la definición de reglas de operación deterministas que definen el reparto de agua entre los distintos usos que existen en una cuenca.

La situación deseable en un sistema de recursos hídricos es aquella en que el volumen de recursos disponibles supera ampliamente el volumen de las demandas, también llamada situación normal, en ella se suministraría la totalidad de las demandas.

Para decidir los usos sobre los que aplicarían restricciones en el suministro se necesita establecer un orden de preferencia o prioridad entre las demandas o usos del agua.

- Usos Urbanos

Para un uso urbano se pueden definir escalones según los siguientes criterios:

1. Primer paso sería el ahorro de agua que se consigue por ahorro de los consumidores mediante una campaña de información pública sobre la situación de riesgo de agotamiento de los recursos y la necesidad de conservación.
2. El siguiente paso es más costoso y se conseguiría mediante la programación de cortes intermitentes en el suministro de agua. Sería necesario estudiar la relación entre el tiempo de corte del suministro y el ahorro conseguido.

- Usos Agrícolas

En el caso de un uso agrícola la definición de escalones dependerá mucho del tipo de cultivos de que se trate. En general, los escalones se generarán en base a los siguientes criterios:

1. La adopción de medidas de control en el riego y los turnos de riego que pueden mejorar la eficiencia global del sistema.
2. Forzar en los cultivos un cierto estrés hídrico que reducirá la producción, pero no se perderá la cosecha.
3. Elección de cultivos de menor consumo de agua.
4. Abandonar el cultivo de cosechas menos productivas.
5. Perder todos los cultivos de temporada para salvar el arbolado, perdiendo también la producción del mismo en esta temporada.

- Usos Hidroeléctricos

En el caso de un uso hidroeléctrico, el criterio es diferente. Diariamente el precio de la energía es variable, de manera que si se reduce las horas en que se turbinan el precio de la energía es mayor. Se analiza el suministro a escala mensual, a diferencia de lo que ocurre con los otros usos, el beneficio obtenido en una central hidroeléctrica por unidad de volumen de agua suministrado sería decreciente. Las reglas de operación deben ir encaminadas a reducir estos vertidos.

Cuando se comparan dos usos con diferente prioridad como son el abastecimiento y el riego, puede procederse definiendo escalones en ambas demandas, por el costo económico y social de cada una de las restricciones.

c) Reglas para la gestión de embalses

Cuando se dispone de varios embalses en un sistema de recursos hídricos es necesario determinar la procedencia del agua que se suministra. Para responder a esta cuestión es necesario definir reglas para la operación conjunta de la totalidad de los embalses y demás recursos disponibles en el sistema.

Las restricciones tanto para demanda urbana como para demanda agrícola, van en función de la prioridad entre las demandas, desentendiéndose del volumen de los recursos del sistema en cada momento, que consiste básicamente en el almacenamiento del embalse.

En un sistema de recursos hídricos con múltiples embalses y demandas, habrá demandas que podrán servirse desde cualquier embalse, y demandas que solo puedan abastecerse desde uno embalse, en estos casos será necesario establecer reservas en los embalses para que los criterios de prioridad entre las demandas puedan cumplirse.

En caso de poseer embalses en serie, será más conveniente consumir antes el agua del embalse de aguas abajo que del de aguas arriba porque el resultado es siempre una reducción del volumen total de agua vertida conocida como regla de almacenamiento aguas arriba.

En el caso de poseer embalses en paralelo, no existe la ventaja anterior de que los vertidos de uno se puedan almacenar en el siguiente, sino que los vertidos de cualquiera de los dos saldrían del sistema.

Al igual que para los usos, en la modelación de los embalses se han definido prioridades para el almacenamiento de agua en unos embalses más que en otros, obteniendo la repartición más homogénea del agua entre los embalses.

d) Reglas para la gestión de acuíferos.

Podría decirse que los acuíferos son un embalse natural de agua. Sin embargo existen numerosas diferencias importantes entre los acuíferos y los embalses como órganos de almacenamiento de agua:

- La extracción del agua subterránea es generalmente más cara que el agua superficial.
- Un embalse tiene pérdidas por evaporación que no tiene un acuífero.
- Los embalses pueden tener usos múltiples como es de contención de avenidas que requiere tener el embalse parcialmente vacío.
- El flujo en acuíferos es más lento.
- El flujo en acuíferos es menos controlable que en embalses.

Con frecuencia, el volumen que puede almacenar un acuífero es de una magnitud superior al de los embalses superficiales. Esto hace que el servicio a la demanda esté garantizado si se crea la capacidad de extracción necesaria.

Estas condiciones hacen que los acuíferos sean un recurso adicional importante para aumentar la garantía de suministro del sistema superficial mediante el uso conjunto de las aguas subterráneas, que puede consistir en:

- El uso mayoritario de aguas superficiales en años húmedos y de aguas subterráneas en años secos.
- Efectuar recargas artificiales de acuíferos en años húmedos.

e) Reglas para otros objetivos.

En un SRH real existen criterios y objetivos de uso que no se atienden únicamente mediante asignaciones de agua, sino que implican otros requisitos. Un ejemplo habitual es la necesidad de mantener la cota de embalse alta para aumentar la producción de las centrales de pie de presa.

En el análisis de sistemas de recursos hídricos, hay que considerar todas las condicionantes existentes y traducirlas en restricciones u objetivos que se modelan en las aplicaciones matemáticas desarrolladas para el análisis del sistema.

4.5.4 Incertidumbres en las Reglas de Operación

Se han hecho avances con respecto a considerar las incertidumbres como fenómeno inherente en las reglas de operación en un SRH. Las incertidumbres de los procesos hidrológicos (sequías, crecidas) y de las demandas impuestas, así como las incertidumbres económicas y sociales son los factores aleatorios que tienen mayor impacto en la operación de un SRH.

Con los modelos matemáticos se logra ofrecer una aproximación certera de la realidad, simplificando la gran diversidad y complejidad de los sistemas en un número reducido de procesos claramente discernibles y en general fácilmente asimilables a las leyes físicas. Para la gestión de los SRH complejos ya sea en las etapas de planeación y/o operación

se han hecho uso de modelos matemáticos en sus diversas formas: optimización, simulación.

Los métodos de optimización estocástica generalmente no pueden acomodar todas las incertidumbres inherentes en la operación de un SRH del mundo real. Esto es debido parcialmente a la incapacidad de cuantificar la estocasticidad de cada uno de los procesos que se encuentra envuelto un SRH (por ejemplo el desarrollo económico, la migración poblacional y los cambios resultantes es casi imposible traducirlos en cantidad y distribución de agua a las demandas). El incluir varios aspectos de las incertidumbres dentro del análisis, daría como resultado una modelación más compleja y costosa.

La formulación de modelos estocásticos está en la mayoría de casos concentrada en la consideración explícita de una única incertidumbre, que se considere más relevante. Por lo que comúnmente, la única incertidumbre incluida en la etapa de diseño (fase de planeación) de las reglas de operación de un SRH esta frecuentemente asociada a la naturaleza estocástica de los caudales del río (incertidumbres hidrológicas).

5 ESCENARIOS CLIMÁTICOS

5.1 Modelos de circulación general de la atmosfera.

Se han realizado una serie de simplificaciones que tienen en cuenta sólo las propiedades más importantes y básicas de algunos sistemas. Estas versiones simplificadas de la realidad se llaman modelos, son una descripción aproximada de los fenómenos reales a escala global que nos permite comprender los efectos del Cambio Climático y predecir los escenarios climáticos a escala regional.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), ha reunido alrededor del mundo un grupo de expertos para realizar una serie de simplificaciones que nos permitan modelar los escenarios a los que tiende una determinada zona de estudio. Estos expertos llamaron a estas simplificaciones como Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG o GCMs por sus siglas en ingles).

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera se pueden definir como: “La representación del clima futuro que es internamente consistente, la cual ha sido construida empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser empleada para comprender las soluciones del cambio climático de los sistemas medio ambientales y sociales”.(ver)

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. Dichas ecuaciones se representan por medio de modelos en capas en una retícula de celdas tridimensionales asignadas a distintos valores a las diferentes variables o capas. Para catalogar estas capas se toma en cuenta el uso y tipo de suelo de la zona de estudio, su topografía, identificar los cuerpos de agua, considerar la temperatura superficial y del océano, además de la nubosidad y salinidad.

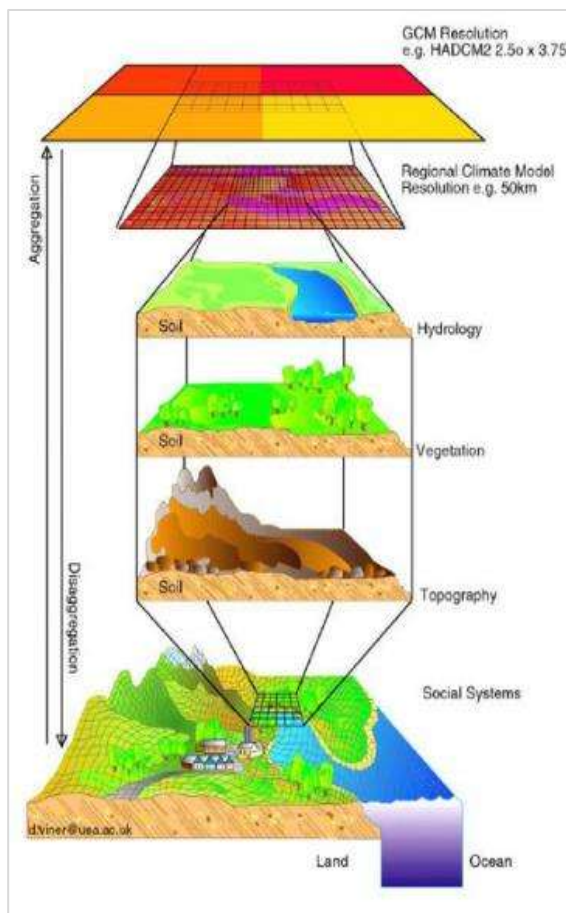


Fig. 5.1 Esquema de los Modelos de Circulación General

Actualmente, se dispone de modelos tan complejos que consideran no sólo para la atmósfera, sino también la dinámica de los océanos (MCGAO-A), de la biosfera, y la criósfera (casquetes de hielo y nieve).

Una de las estrategias que se recomiendan para generar escenarios del clima futuro es trabajar con diversos GCM s, preparando experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes entre sí, bajo diversos forzantes (causas del cambio climático) radiactivos resultado del aumento gradual de las concentraciones Gases de Efecto Invernadero, para conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima.

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. 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 IPCC. 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.

Hoy en día se cuenta con simulaciones de cambio climático confiables, al menos en escalas espaciales subcontinentales de una estación a periodos de tiempo. El grado de respuesta del sistema climático a un cambio definido en alguno de los factores que lo determinan es la sensibilidad climática. En los modelos recientes de clima actuales se consideran de forma clara 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.

La resolución espacial típica de los GCMs (300 km x 300 km) no permite obtener detalles si queremos emplear un modelo para el Estado de Michoacán, el Instituto Nacional de Ecología (INE) realizó una regionalización que permite el estudio de los Modelos de Circulación General a una resolución de 50km x 50km.

En nuestra investigación, empleamos los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs) para proyectar el clima de la Cuenca del Río Grande de Morelia para los periodos de estudio Octubre 2010 – Septiembre 2040, Octubre 2040 – Septiembre 2070 y Octubre 2070 – Septiembre 2100.

Estos Modelos de Circulación General permiten obtener las variaciones de temperatura mensual que tendremos en el Estado, así como el porcentaje de precipitación que caerá dentro de nuestra zona de estudio.

La importancia de conocer esta variación en las temperaturas y precipitaciones es que a partir del estudio del comportamiento histórico de estas variables, podemos predecir mediante métodos estadísticos, cuál será la cantidad de precipitación en Michoacán hasta el año 2100 y el aumento de temperaturas al mismo año.

Es cierto que si a futuro obtenemos el grado en que afectará el cambio climático, se podrán establecer medidas de mitigación y prevención a los efectos ocasionados por fenómenos naturales como: inundaciones, huracanes y sequias; con la finalidad de evitar pérdidas humanas y fomentar la correcta explotación de los recursos que tiene nuestro Estado.



Fig. 5.2 Efectos del Cambio Climático en Michoacán.

5.1.1 Modelos Regionales del Cambio Climático

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera han permitido simular de manera acertada procesos como el funcionamiento de la atmósfera, incluyendo elementos importantes como nubes, radiación y vientos.

Al paso del tiempo, se ha encontrado que los principales factores que establecen el estado base del clima son: la energía del sol, la velocidad de rotación y la masa del planeta, la composición química atmosférica y la distribución de océanos y continentes. Los Modelos Globales de Circulación Atmosférica permiten crear escenarios que proyecten la condición climática más probable.

No obstante, la resolución espacial típica de los MCGs 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. Por ello, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en conjunto con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM desarrollaron la regionalización de los Modelos de Circulación General para la superficie de nuestro país. A su vez, ambos institutos crearon el Modelo Ensemble, el cual representa una media multimodelo de las variables del clima proyectadas por los modelos matemáticos aceptados por el IPCC.

El objetivo de proyectar las precipitaciones y temperaturas por Ensemble, es proporcionar un cuadro más detallado de la serie de estados futuros posibles del clima que sea consistente con nuestro conocimiento del sistema, permitiendo evaluar conjuntamente con proyecciones de la vulnerabilidad, qué puede ocurrir y conocer cuáles son las diferentes alternativas que el usuario tiene para la gestión del riesgo en una zona determinada.

La regionalización de los Modelos de Circulación General permite que se incluyan factores locales como hidrología, topografía, geología, clima, uso del suelo, etc.; los cuales no son representados satisfactoriamente a escala global.

Los métodos más empleados para la regionalización de modelos son: la creación de modelos de circulación general a alta resolución, modelos anidados de área limitada, y los métodos empírico-estadísticos o estadísticos-dinámicos.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático en el 2007, propuso una metodología con el fin de servir como guía para la creación de nuevos escenarios climáticos regionales. Dicha metodología se realiza en base a la herramienta “Climate Predictability Tool” desarrollada por el Instituto Internacional para la sociedad y el clima de la Universidad de Columbia.

El CPT se basa en un esquema de ajuste de las salidas de un Modelo Global de Circulación Atmosférica, siguiendo como prototipo una simulación conocida como Model Output Statistics, la cual corrige los errores sistemáticos de los MCG's.

Para poder aplicar esta metodología, es necesario que la regionalización de los escenarios de cambio climático cumpla con las siguientes características:

- a) Consistencia a nivel regional con las proyecciones globales.
- b) Plausibilidad física y realismo. Información apropiada para las evaluaciones de impactos (resolución, horizonte y variables).
- c) Representatividad del rango potencial de cambio climático regional.
- d) Actualidad de las simulaciones (experimentos numéricos más recientes).
- e) La más alta resolución espacial y Validez (que reproduzcan en lo posible el clima observado).
- f) Representatividad de sus resultados (seleccionar salidas de modelos que den un rango representativo de los posibles cambios futuros).
- g) Comparabilidad con estudios anteriores.
- h) Ser útiles para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.

Es importante tomar en cuenta que la climatología regional debe ser comparada con la global en un periodo no menor de 20 años, sin embargo es común tomar 30 años como base de estudio.

Los datos utilizados para la generación de escenarios de cambio climático regionalizados deben corresponder a una base de datos de las variables temperatura y precipitación de un periodo histórico de 30 años, con resolución temporal mensual y con una resolución espacial de 50km x 50km.

5.1.2 Principales MCGAO-A Modelos generales de circulación.

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.

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; según INE solo 10 países en todo el mundo han desarrollado software para proyección de las variables climáticas. 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.

Para elegir uno o varios modelos se deben tomar en cuenta que los resultados cumplan con las especificaciones requeridas por los MCGAO-A y así poder elegir el modelo que mejor presente en los resultados de la zona de estudio. En la Tabla 5.1 se presentan los

modelos generales de circulación que presentaron resultados después del 1 de septiembre de 2006 en el archivo de datos del IPCC.

Los modelos de circulación general utilizados para generar el ensamble ponderado de modelos según la metodología REA (Reliability Ensemble Averaging) son:

Tabla 5.1 MCGAO-A para la modelación del clima actual y futuro. Fuente INE 2007.

Modelo abreviado	Nombre del modelo / Pais de origen
bcc_csm-1	BCC-CM1 Beijing Climate Center, China
bccr_bcm2_0	Modelo Bergen Climático (BCM) versión 2 Bjerknes Centro de Investigaciones sobre el Clima, Noruega
cccma_cgcm3_1	Modelo junto Climático (CanESM2) Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, Canadá
cnrm_cm5	CNRM-CM5 Center National of Research Meteorologiques, Francia
csiro_mk3-6	CSIRO Marcos 3,0 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia
gfdl_cm2_0	CM2.0 - AOGCM Geophysical Fluid Dynamics laboratory, EE.UU.
gfdl_cm2_1	CM2.0 - AOGCM Geophysical Fluid Dynamics laboratory, EE.UU.
giss_aom	AOM 4x3 NASA Goddard Institute for Space Studies, EE.UU.
giss_model_e_h	Modele GISS-H NASA Goddard Institute for Space Studies, EE.UU.
giss_model_e2_r	Model GISS-R NASA Goddard Institute for Space Studies, EE.UU.
iap_fgoals1_0_g	FGOALS1.0_g Instituto de Física Atmosférica, China
inmcm3_0	INMCM3.0 Institute for Numerical Mathematics, Rusia
miroc3_2_hires	MIROC3.2 Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón
miroc3_2_medres	MIROC3.2 Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón
mpi_echam5	ECHAM5/MPI-OM Max-Planck Institute, Alemania
mri_cgcm2_3_2a	RM CGCM2.3.2 Instituto de Investigación Meteorológica de Japón
ncar_ccsm3_0	Sistema Climático de la Comunidad del modelo, versión 3.0 (CCSM3) NCAR, EE.UU.
ncar_pcm1	Paralelamente los Modelos Climáticos (PCM) NCAR, EE.UU.
ukmo_hadcm3	HadCM3 UKMetO, Hadley Center, Reino Unido
ukmo_hadgem1	Hadley Centro Mundial del Medio Ambiente del modelo UKMetO, Hadley Center, Reino Unido

5.1.3 Evolución de los modelos de simulación del clima

Para llegar a definir los actuales modelos del clima, estos han sufrido una transformación en cuanto al criterio de evaluación. Esta evaluación se debe a los forzantes que cada vez agravan y se hacen más evidentes con el paso del tiempo (Fig. 5.3). El progreso de

evaluación se toma de dos criterios; por el incremento de procesos simulados y por incremento en la resolución tridimensional.

Incremento de los procesos simulados:

- Década 1970 Sol, CO₂, lluvia
- Década 1980 Nubes, superficie del suelo, hielo
- FAR (IPPC 1990): tanque de agua
- SAR (IPPC 1996): Sulfatos, actividad volcánica, océano
- TAR (IPPC 2001): aerosoles, ciclo del carbono, ríos y circulación oceánica convectiva
- AR4 (2007): interacción de la vegetación y procesos químicos atmosféricos

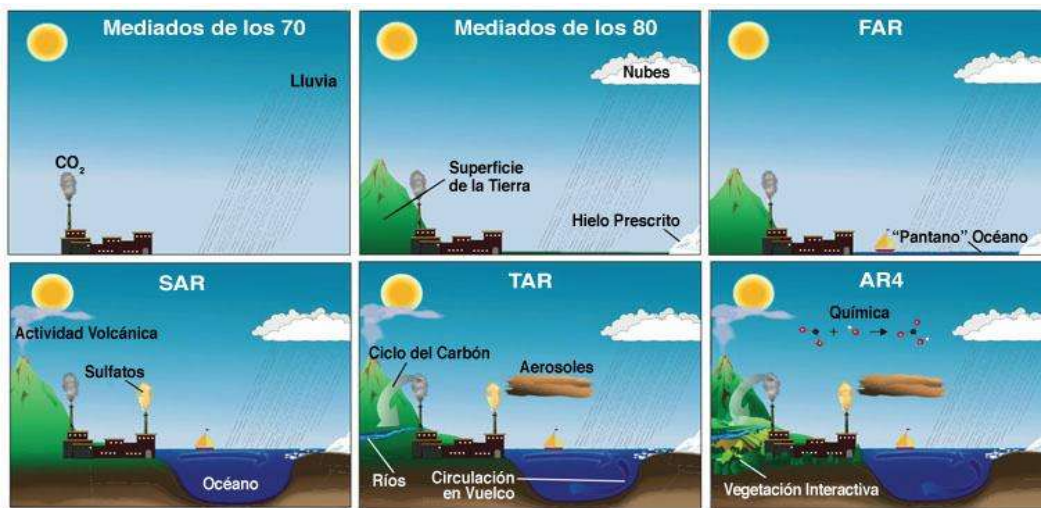


Fig. 5.3 Modelos de cambio climático.

Incremento del detalle de la resolución tridimensional

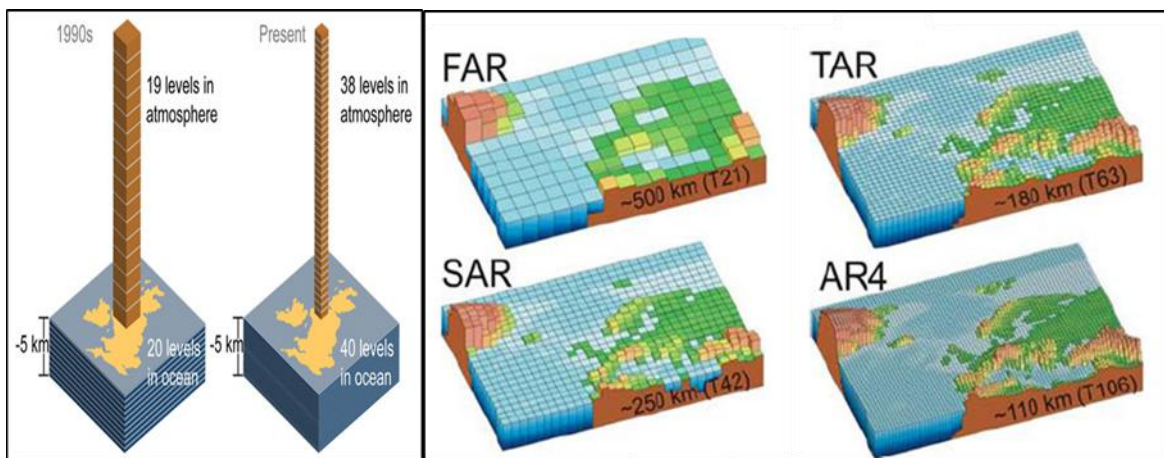


Fig. 5.4 Resolución espacial capas verticales.

Fig. 5.5 Resolución de la evolución de los modelos de Cambio Climático

5.2 Definición de Escenario climático.

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

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:

- a) 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 qué 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.
- b) 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.
- c) 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.

5.3 Tipos de escenarios para estudios de cambio climático.

El análisis del cambio climático involucra demasiadas variables, por lo tanto, se deben plantear múltiples escenarios para tratar de representar la evolución del clima, de las propiedades 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 el aumento de la densidad de población, valores sociales, cambios en la tecnología, entre otros.

Empleando las condiciones sociales y naturales de la actualidad, e imponiendo un cambio climático futuro puede ser una manera poco sencilla para actuar e identificar debilidades y analizar las adaptaciones. Durante este tiempo, es razonable esperar que las condiciones socioeconómicas y naturales cambien, en ocasiones variar drásticamente. Como resultado de estos cambios, la vulnerabilidad al cambio climático y la efectividad de las adaptaciones también pudieran 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 afectan de manera directa la composición de la atmósfera. Estos escenarios toman en cuenta las propiedades de la superficie terrestre debido a una posible conversión de la cobertura vegetal que pudieran alterar las propiedades de los ecosistemas y la vulnerabilidad al cambio climático.

3.- Escenarios ambientales.

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

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

Son escenarios elaborados debido a incrementos de temperaturas en los océanos, principalmente en zonas cubiertas por hielo. Al elevarse la temperatura, los glaciares tienden a derretirse y por consecuencia incrementa el nivel del mar. Los escenarios tratan de calcular cual sería el incremento para años próximos y que poblaciones se verían afectadas en caso de que esto sucediera. Recientemente, algunos estudios han comenzado a expresar futuras elevaciones del nivel del mar en términos de probabilidad, lo que facilita la evaluación del incremento del nivel en términos del riesgo de exceder un nivel crítico del impacto importante.

5.- Escenarios de emisión del IPCC

Los escenarios del IPCC SRES (Special Reports on Emission Scenarios) están dirigidos por varias fuerzas motivadoras referente al cambio climático, incluyendo crecimiento en la densidad de población y el desarrollo socio-económico. Estas fuerzas motivadoras generan varios escenarios futuros que pueden tener una influencia en las fuentes y

sumideros de gases invernadero, como sistemas de energía y cambio en el uso de suelo. La evolución de estas fuerzas motivadoras frente al cambio climático es incierta. Esto resulta en un amplio rango de posibles caminos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los futuros incrementos de temperaturas y el cambio de precipitaciones son las principales variaciones. 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 publico 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 avance. Fueron los primeros escenarios mundiales que daban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero. Por lo tanto, nuestros conocimientos sobre las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y sobre el cambio climático han cambiado en gran medida.

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. El conjunto de escenarios de emisiones del IE-EE (Informe especial sobre escenarios de emisiones) están basados en una extensa evaluación de más de seis metodologías de modelación alternativas en un proceso que reunió la información y la participación de distintos 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 y de azufre, más las fuerzas determinantes de éstos.

Estos escenarios son representados en cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 B2) y para cada línea evolutiva, se han desarrollado varios escenarios basados en diferentes planteamientos de los modelos (Fig. 5.6), con propósito de examinar todos los posibles resultados que se obtendrían de una serie de modelos basados en los factores determinantes. Se emplearon seis modelos, representativos de los criterios de evaluación. Una de las ventajas de basarse en una diversidad de modelos consiste en que los 40 escenarios IE-EE, abarcan casi todos los valores de incertidumbre de la actualidad de las emisiones de GEI que se derivan de diferentes propiedades de los modelos citados, además de los conocimientos recientes sobre las fuerzas determinantes de los escenarios, como lo son los cambios en la demografía, sociales o económicos, incluso los cambios tecnológicos que definen los modelos, conforme lo estipulado en las líneas evolutivas. Solo trece de estos 40 escenarios se exploran distintas variaciones de los supuestos relativos a las tecnologías de la energía.

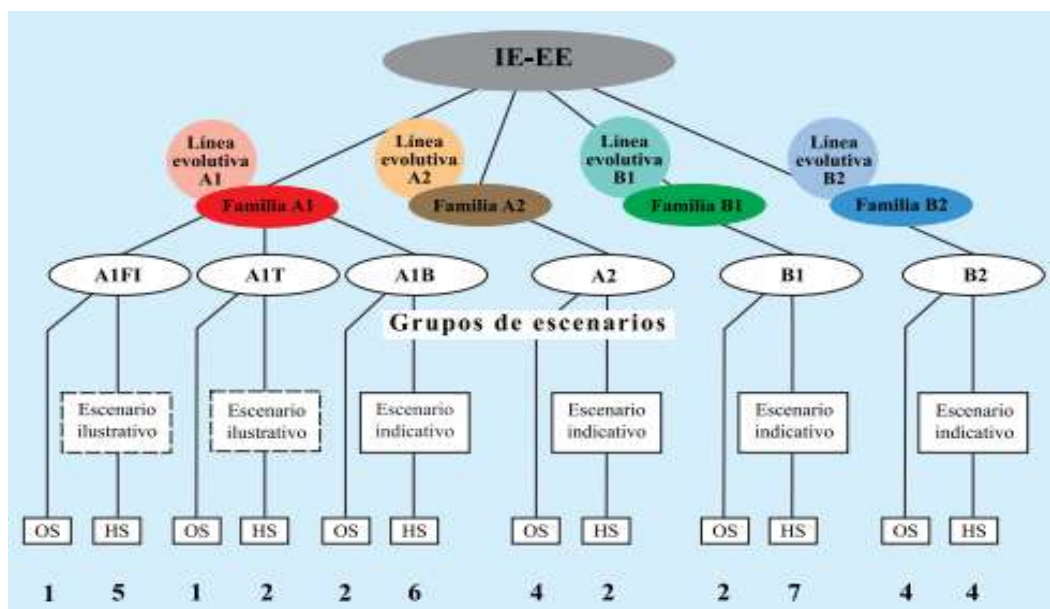


Fig. 5.6 Representación esquemática de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios IE-EE.

Dentro de cada familia, se han desarrollado dos principales tipos 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 conformado 26 escenarios mediante la adopción de unos conjeturas comunes sobre la población mundial y sobre el desarrollo del producto interior bruto (PIB). Así pues, los escenarios pactados 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 hipótesis comunes con respecto a algunos factores determinantes.

Algunas de las principales características de las líneas evolutivas se indican en seguida. En el año 2100 el mundo habrá experimentado cambios que resulta difícil imaginar. Cada línea evolutiva está basada en una dirección diferente de los acontecimientos futuros, de tal manera que las cuatro líneas evolutivas discrepan con un grado de irreversibilidad creciente. En 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” definitivas, como el cambio demográfico, el desarrollo económico o el cambio tecnológico.

La familia de escenarios A1 tiende a evolucionar describiendo el futuro con un mundo con un crecimiento económico apresurado, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, 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 se diferencian en su orientación tecnológica: el uso excesivo de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía alterna a la de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

Para la familia de escenarios A2 las líneas evolutivas describen a un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Los patrones 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 a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fraccionados y se presentan más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas para escenarios B1 describen un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en los escenarios A1, pero con cambios acelerados de las estructuras económicas orientados a una economía de información y servicios, acompañados de una introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento más eficiente de los recursos. También se da mayor importancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor homogeneidad, pero a falta de iniciativas adicionales en relación con el clima.

En la familia de escenarios B2 las líneas evolutivas describen a un mundo en el que abundan soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo donde la población incrementa de manera progresiva con un ritmo menor que en el escenario A2, presentando niveles intermedios del desarrollo económico, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas de las familias B1 y A1. Aunque este escenario está orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles locales y regionales.

En las siguientes figuras podemos observar las emisiones y concentraciones de los gases de efecto invernadero que se utilizan como forzantes para la modelación del clima para el periodo 2000-2100. Los escenarios más críticos 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.

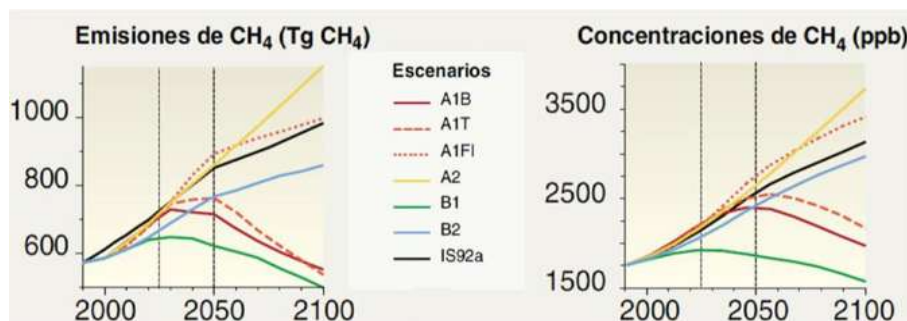


Fig. 5.7 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de CH₄ (Metano) para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

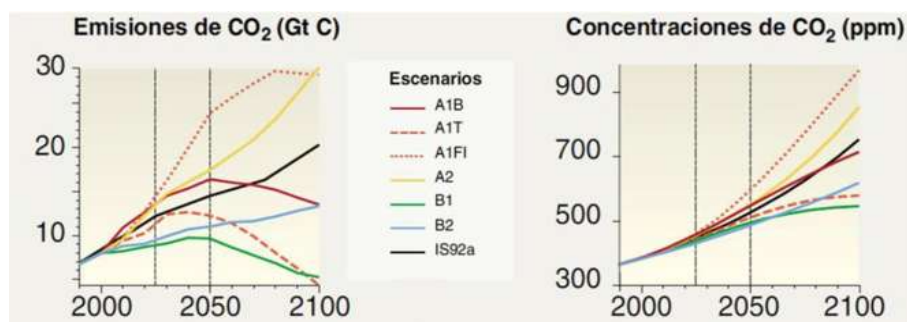


Fig. 5.8 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de CO₂ (Dióxido de Carbono) para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

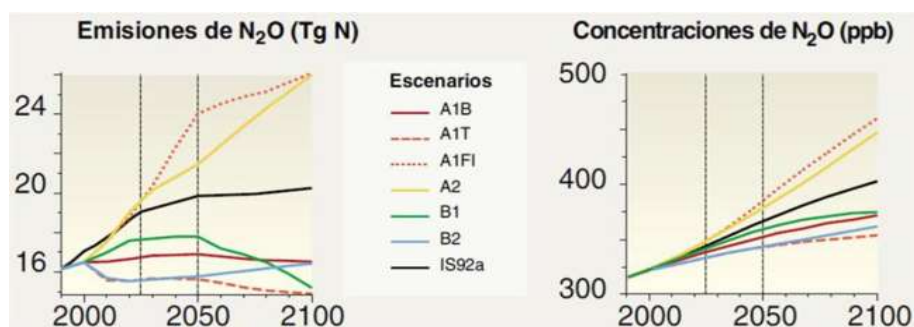


Fig. 5.9 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de C₂O (Oxido de nitrógeno) para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

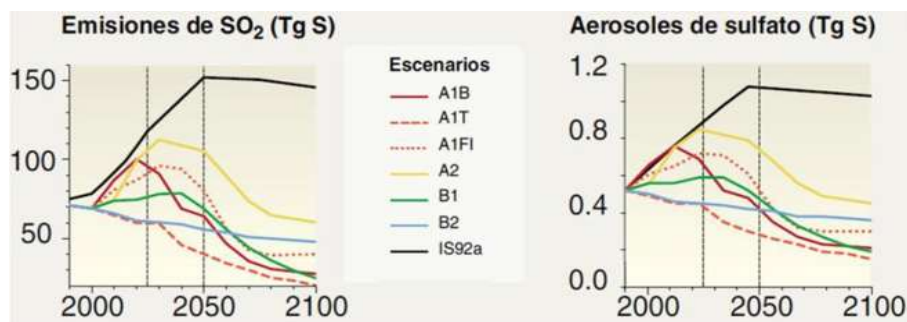


Fig. 5.10 Emisiones (izquierda) y concentraciones (derecha) de SO₂ (Dióxido de azufre) para los diferentes escenarios de cambio climático. Fuente IPCC 2000.

Los escenarios de emisiones de GEI se basan en una población mundial para realizar las modelaciones del cambio en la temperatura y la precipitación como podemos observar en las Fig. 5.7, Fig. 5.8, Fig. 5.9 y Fig. 5.10, las mayores concentraciones se dan en las familias que tienen desarrollos más lentos y una mayor población, en La Fig. 5.11 se muestra la población mundial en billones para los diferentes escenarios de cambio climático.

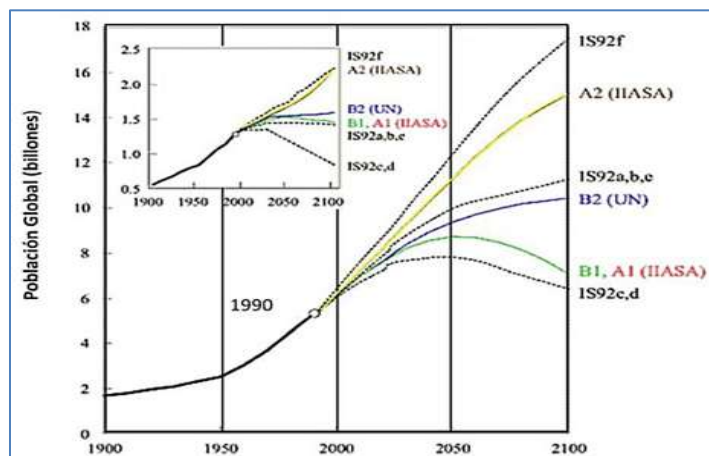


Fig. 5.11 Población mundial considerada en las emisiones de los GEI para los escenarios IS92 y SRES/IE-EE. Fuente IPCC 2000.

Existen diferencias importantes entre los escenarios IS92 y SRES en cuanto a las proyecciones de temperatura como se puede ver en la Tabla 5.2, donde el mayor aumento en la temperatura es 2.64 °C referente al escenario IS92e con un intervalo posible de 1.83 °C a 3.73 °C. En lo correspondiente a los escenarios SRES las mayores variaciones se presentan en el escenario A1FI en donde su estimación óptima de temperatura es de 4 °C con una variación de 2.4 °C a 6.4 °C.

Tabla 5.2 Proyecciones en el aumento de temperatura para finales del siglo XXI.

Aumento en la Temperatura (°C)		
Escenario	Estimación Optima	Intervalo 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
A1FI	4.0	2.4 - 6.4

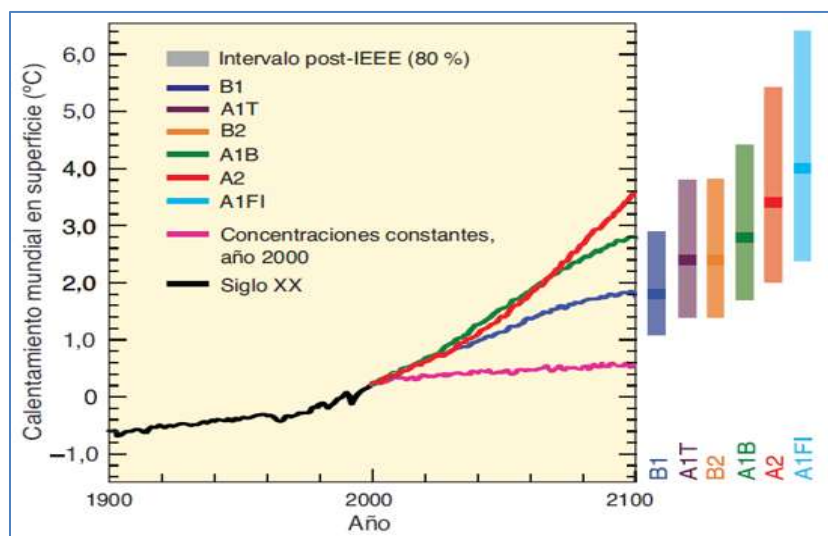


Fig. 5.12 Promedios mundiales del calentamiento en superficie para los escenarios IEEE. Fuente IPCC 2007.

Se observa en la Fig. 5.12 las líneas que representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de MCGAO en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEEE en el período 2090-2099.

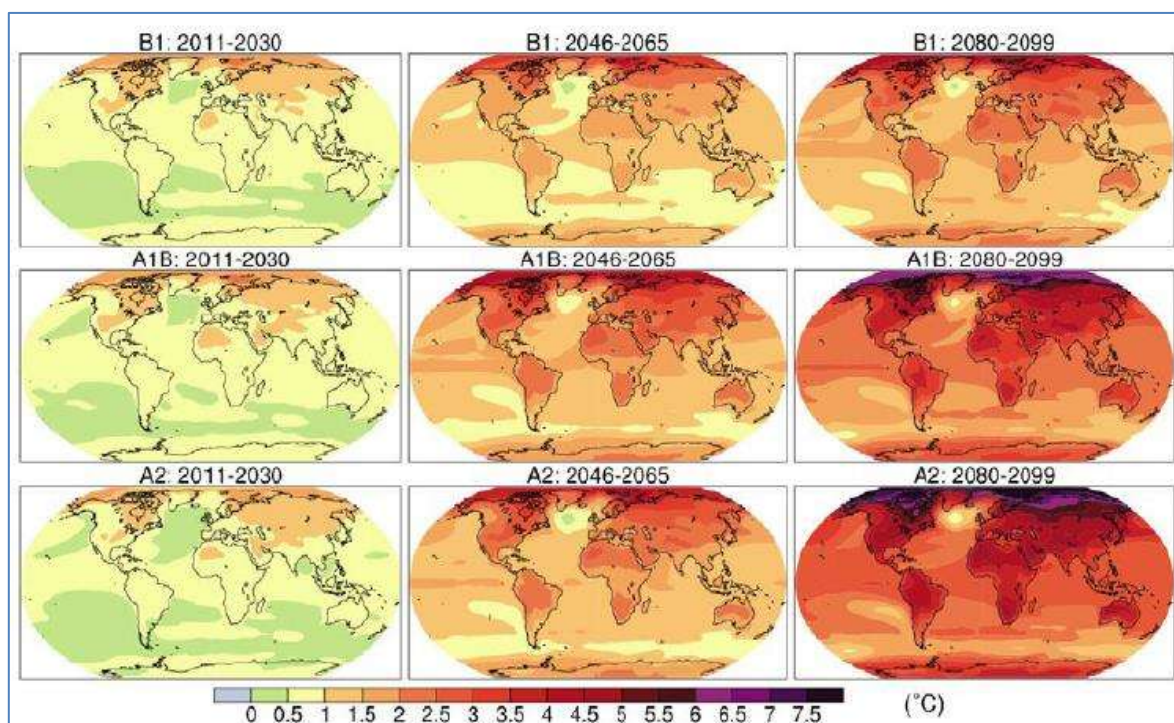


Fig. 5.13 Variabilidad espacial de los resultados del cambio de temperatura.

5.4 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 medida 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.

5.4.1 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 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 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.
- Escenario B1 se cuenta con 20 modelos para el periodo 2000-2100.
- Escenario de compromisos de reducción de emisiones (COMMITTED) se cuenta con 17 modelos para 2000-2100.

5.4.2 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.

5.4.3 Escenario ensamble 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% 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 en promedio anual.

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.

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%, 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.

Es de esperarse que la combinación de incremento de la temperatura y disminución de las lluvias, haga de Michoacán un estado árido. Estos cambios tendrán impactos muy negativos para la población del Estado y afectando de igual manera en la producción agropecuaria y forestal del estado, así mismo impactara negativamente a la flora y fauna silvestre.

Para más detalle del escenario ensamble para el Estado de Michoacán consultar la tesis “Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos”

6 GESTIÓN DE LA CUENCA CON CAMBIO CLIMÁTICO.

6.1 Datos históricos de la Ciudad.

Morelia es la capital de Michoacán y cabecera del municipio del mismo nombre. La ciudad fue fundada por el Virrey Don Antonio de Mendoza el 18 de mayo de 1541, con el nombre original de “Nueva Ciudad de Mechuacán”, que cambió a “Valladolid” por orden del rey Carlos I de España el 6 de febrero de 1545 y se le concedió el título de ciudad. Pero desde el 11 de septiembre del 1828 se llama “Morelia” en honor a su hijo Don José María Morelos y Pavón, héroe de la Independencia de México.

La ciudad se erigió en el valle de Guayangareo cuyo significado es "loma chata y alargada", lugar en donde habitaba el pueblo Matlalzincas durante los siglos XIV o XV. Se sabe que al instalarse en el mencionado valle, los Matlalzincas recibieron el nombre de "Pirindas", es decir "los de en medio", debido a la ubicación del lugar que ellos llamaron Patzinyegui.

Cristóbal de Olid pasó por el lugar en 1522 cuando fue a sostener una entrevista pacífica con el gobernante purépecha, siendo la primera vez que pies europeos hollaban suelo Guayangareense. Entre 1530 y 1531 los franciscanos Antonio de Lisboa y Juan de San Miguel llegaron para construir el primer asentamiento español en la zona, edificaron una capilla dedicada a San Francisco de Asís y el primitivo colegio de San Miguel, a fin de facilitar la evangelización de los naturales del lugar.

En 1543 se trazó la ciudad conforme a las reales ordenanzas de Felipe II, sobre una amplia loma en el rico Valle de Guayangareo rodeado de montañas, con vastos bancos de cantera que fueron empleados abundantemente para la construcción de templos, seminarios, conventos, colegios, hospitales, plazas, portales, fuentes, casas y para el Acueducto, entre otros.

Sus edificios, son reflejo de la majestuosidad arquitectónica de la época virreinal. Estos inmuebles se asientan sobre una suave loma de cantera que abarca 390 hectáreas distribuidas en 219 manzanas con 15 plazas de cantera rosa, de ahí algunos de los sobrenombres de Morelia son "La Ciudad de la Cantera Rosa" y "El Jardín de la Nueva España".

Morelia es la ciudad mexicana con más edificios catalogados como monumentos arquitectónicos (posee 1,113 y de ellos 260 fueron señalados como relevantes). Esto llevo a que el 12 de diciembre de 1991, la UNESCO le otorgara el reconocimiento "Patrimonio Cultural de la Humanidad". Estimó también que la arquitectura monumental de la ciudad se caracteriza por su estilo calificado como “barroco moreliano”, por la originalidad de sus expresiones locales que se plasman en el Acueducto, la Catedral Metropolitana, en el conjunto de la iglesia de la Compañía y el ex Colegio Jesuita así como en las fachadas y las arcadas de los corredores y patios de las casas Vallisoletanas.

Las calles y plazas de la capital michoacana se apegan a la forma de retícula irregular y muchas de ellas rematan con un monumento que origina espectaculares perspectivas.

La ciudad de Morelia (Fig. 6.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) crece día a día, y las necesidades presentes, propician a la construcción de nuevas colonias, y esto produce que la ciudad trate de mantenerse a la vanguardia, pero siempre manteniendo su esencia colonial, se han levantado hoteles para satisfacer la afluencia turística, nuevos campos de golf de carácter internacional, centros comerciales que se muestran más novedosos, para perfilarla como una metrópoli importante en el país. La ciudad es centro de distribución y mercado del área agrícola circundante, y de venta y distribución de ganado. Su industria cuenta con molinos de harina, plantas procesadoras de alimentos y fábricas de productos químicos y forestales.

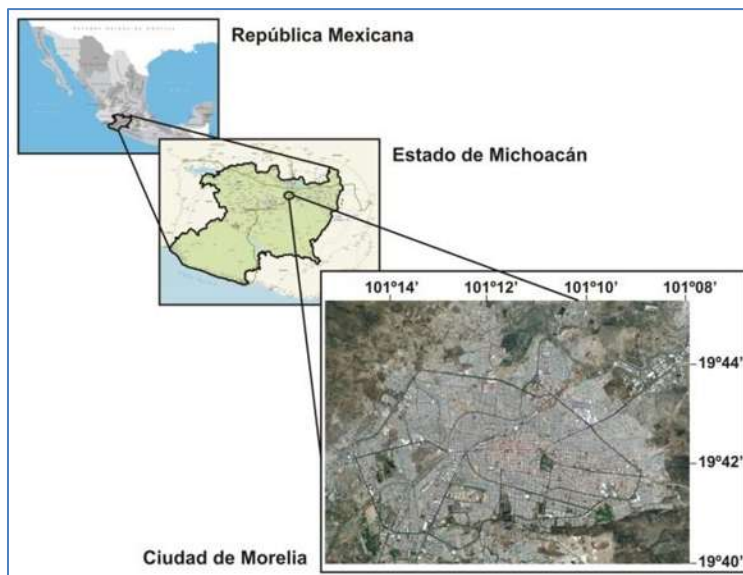


Fig. 6.1 Ubicación de la ciudad de Morelia.

6.1.1 Demografía de la ciudad de Morelia

Morelia es la ciudad más poblada y extensa del estado de Michoacán con una población de 597511 en el año 2010 (608049 habitantes en el 2005). Es la tercera ciudad más poblada de la Región Bajío, superada sólo por León de los Aldama y Santiago de Querétaro. El área conurbada incluye varias localidades del municipio de Morelia (Fig. 6.2). Por otro lado, la Zona Metropolitana de Morelia, conformada por los municipios de Morelia y Tarímbaro, tenía en el 2010 un total de 807902 habitantes al 12 de junio de 2010.

El municipio de Morelia ocupa el segundo lugar en crecimiento a nivel estatal, solamente por debajo del vecino municipio de Tarímbaro. Por otra parte, de acuerdo con los resultados XIII Censo de Población y Vivienda, el 12 de junio de 2010, la población municipal fue de 729279 hab. (Tabla 6.1)

Debido al gran crecimiento de la ciudad, ésta ha rebasado sus límites originales y absorbido diversas localidades contiguas, formándose así una conurbación que integra a la ciudad de Morelia, propiamente dicha, y a otras siete localidades del municipio de Morelia y 12 del municipio de Tarímbaro.

La cuenca del río Grande 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.

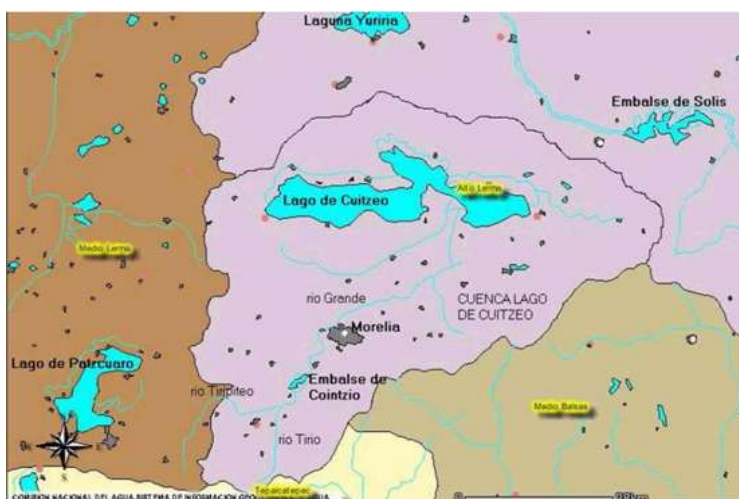


Fig. 6.3 Ubicación de la cuenca del río Grande de Morelia.

Cabe mencionar que en esta zona del Estado de Michoacán se localiza el mayor número de obras de almacenamiento, entre las que sobresale la Presa de Cointzio que presenta una capacidad total de 84,800,000 m³, teniendo la función de abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia.

El Río Grande de Morelia es el más importante afluente de la región, y este se origina en la unión de los ríos Tiripetio y Tirio aguas arriba de la población del Santiago Undameo, fluye con rumbo noroeste y su caudal es controlado por la Presa Cointzio aguas abajo.

De la presa de Cointzio hasta el Lago de Cuitzeo, el río toma la función como canal de conducción mientras recibe varias aportaciones que se utilizan para riego. Recibe aportación del río Chiquito y que se une al río Grande en el cruce con la ciudad de Morelia, esta es la ciudad más importante y con mayor actividad en el sistema. A partir de esta zona urbana toma rumbo al noreste, constituido por un tramo recto, atravesando de sur a norte los valles Álvaro Obregón-Queréndaro, mediante el denomina río Rectificado de Morelia.

El sistema adopta aguas residuales de 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 cuerpos de agua cercanos a la zona son, el embalse de Loma Caliente ubicada al suroeste de Morelia, Presa Cointzio ubicada al suroeste de la ciudad, el embalse la Mintzita ubicada al suroeste de la misma y el Lago de Cuitzeo ubicado al norte de la ciudad.

6.3 Acuífero Morelia-Queréndaro.

El acuífero Morelia-Queréndaro se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán (Fig. 6.4), se encuentra localizado entre los paralelos 19°35' a 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°45' a 101°25' de longitud oeste, cuenta con una superficie aproximada de 3,507 km².

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.



Fig. 6.4 Ubicación del Acuífero Morelia-Queréndaro.

El acuífero abarca parcial o totalmente algunos municipios del Estado (Fig. 6.5); abarca en su totalidad a los municipios de Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copándaro, 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.

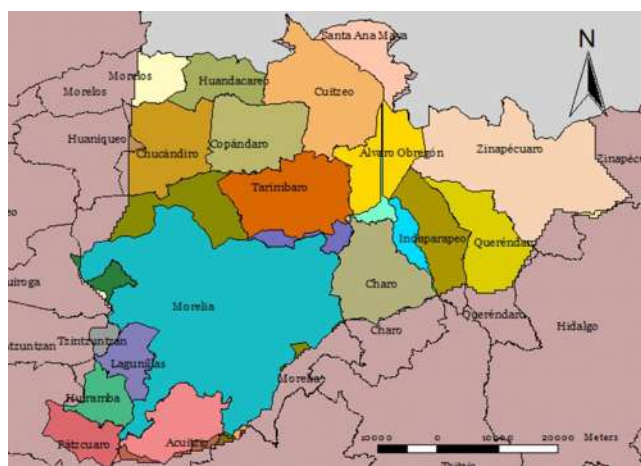


Fig. 6.5 Municipios de la cuenca del río Grande.

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 (CONAGUA 2011).

Se han hecho diversos estudios al acuífero Morelia-Queréndaro con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona. De los cuales se ha analizado toda la información recabada para tener una idea más certera del funcionamiento de dicho acuífero.

Forma parte de una serie de sistemas lacustres localizados en el Cinturón Volcánico TransMexicano que son producto de la evolución tectónica y magmática intra-arco relacionada a la subducción de la Placa del Pacífico en la de Norteamérica. 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 sistema acuífero. Están presentes ígnimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente.

Dentro del acuífero se tienen 963 pozos y 23 manantiales en la zona de estudio. La profundidad del nivel estático de los pozos se encuentra entre los rangos de 0 a 250 m.

La profundidad igual o menor de 10 m se presenta en 88 pozos, destacando el valle de Álvaro Obregón y Huandacareo. En la zona de alrededor del lago de Cuitzeo y los municipios de Santa Ana Maya y Morelia se tienen pozos que presentan profundidades mayores a los 10 m o de hasta 40 m. Los pozos de mayor profundidad se localizan en Morelia, alcanzando los 214 m.

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t) , corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor es de 286.7 hm³/año.

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Morelia-Queréndaro, el volumen de las descargas naturales comprometido es de 127.8 hm³/año, correspondientes a la evapotranspiración total, las salidas horizontales y las descargas naturales a través de manantiales; para proteger el ecosistema del Lago de Cuitzeo, que se considera una zona de regulación natural del clima de la región.

Tabla 6.2 Balance de entradas y salidas del acuífero.

Entradas	Volumen (Hm ³ /año)	Salidas	Volumen (Hm ³ /año)
Recarga vertical	160.2	Evapotranspiración	64.2
Recarga inducida	38.5	Bombeo	162.2
Entrada subterránea	88	Salidas subterráneas	3.3
		Descarga de manantiales	60.3
		Cambio de almacenamiento	-3.3
Total de entradas	286.7	Total de salidas	286.7

El volumen anual de extracción al 2007 era de 162'228,770.98 m³ anuales, 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.

La disponibilidad de aguas subterráneas (Fig. 6.6), constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Pero el volumen de extracción es mayor a la disponibilidad de agua subterránea, esto indica que existe un déficit de 20'948'316 m³ anuales; así que el acuífero se encuentra sobreexplotado. Por lo tanto este acuífero se declaró en veda por el REPD.

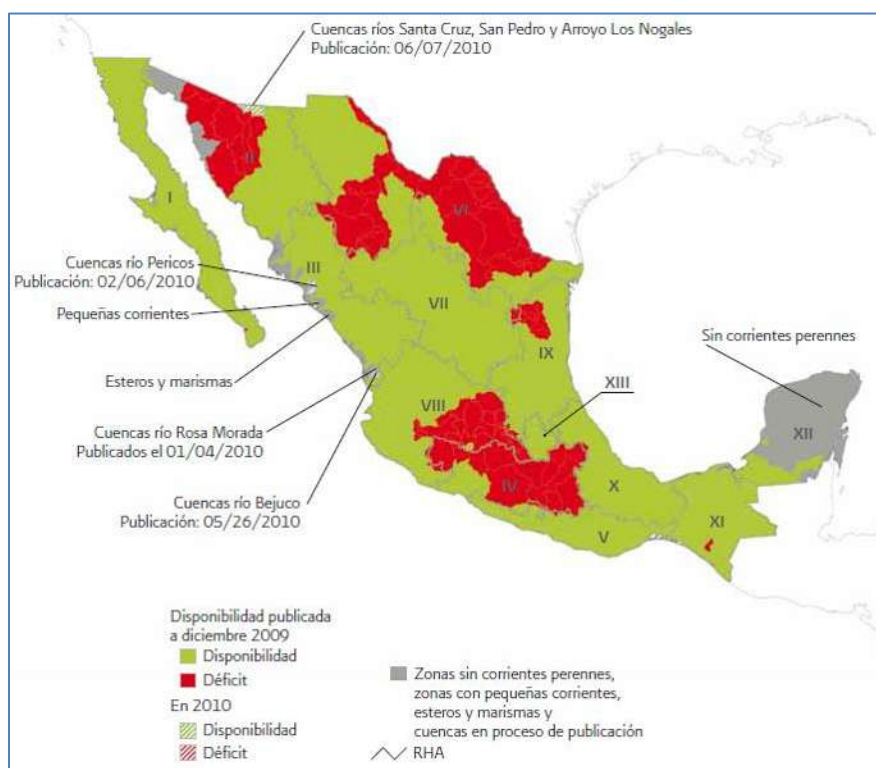


Fig. 6.6 Cuencas hidrológicas con disponibilidad hídrica. Fuente: Conagua. Subdirección General de Programación. 2010.

6.3.1 Fisiografía

La fisiografía o geografía física que presenta el acuífero Morelia-Queréndaro, según INEGI, se ubica en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, este abarca parte de tres subprovincias; la Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y la de 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 de fosas tectónicas. El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas, formando la sierra volcánica transversal y creando peculiares paisajes de distintas morfologías.

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.

6.3.2 Geomorfología

La geomorfología que presenta el acuífero se define por el producto de desplazamientos tectónicos y a la intensa actividad volcánica, aunados a la erosión. Hay dos unidades morfológicas presentes en la zona: uno es la combinación de montañas y lomeríos, y otro es de valles.

Las montañas y lomeríos se constituyen principalmente por rocas ígneas extrusivas de la edad terciaria, en la parte sur de la zona existen andesitas y basaltos del Paleógeno-Neógeno, sus montañas presentan un relieve abrupto, con pronunciadas pendientes escarpadas.

Los valles fueron originados por actividad tectónica y fluvial, ocupando la mayoría de la proporción de tres zonas 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 desembocan al lago de Cuitzeo. La

corriente superficial más importante es el río Grande de Morelia, corre por un estrecho valle fluvial, situado en la porción occidental de la zona y desembocando en dicho lago.

6.3.3 Geología

El estado de Michoacán de Ocampo está comprendido en dos provincias geológicas: Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. La primera provincia, la comparte con los estados de Colima, Jalisco, Guerrero y México; y la segunda con Jalisco, Guanajuato, Querétaro y México.

El relieve estructural original de la provincia del Eje Neovolcánico está constituido esencialmente por rocas volcánicas jóvenes (del Cenozoico Superior), aunque también están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente.

En Michoacán son muy importantes las zonas lacustres, geológicamente están relacionadas con una serie de eventos tectónicos relativamente recientes asociados con los fenómenos volcánicos.

La energía geotérmica es uno de los recursos más importantes de esta provincia, ya que existen numerosos focos con manifestaciones hidrotermales que reflejan una zona privilegiada en este tipo de recurso.

En el área afloran rocas de origen ígneo extrusivo y sedimentario continental, las primeras están constituidas por derrames de lavas, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas, cuyas composiciones varían desde ácidas hasta básicas; esto es ignimbritas, andesita y basaltos, sus edades van desde el Mioceno Inferior al Reciente, siendo las más antiguas unas tobas riolíticas de edad del Mioceno Inferior, siguiéndole en edad unas rocas de andesita 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 rocas ignimbriticas le siguen en edad emisiones volcánicas de composición andesítico-basáltica y basáltica, de edad Plioceno, a los que le suceden otra serie de derrames, y edad Plioceno-Cuaternario y composición basáltica y basalto-andesítico para finalmente, definirse la unidad volcánica más joven del área, a la cual se le asignó una edad del Cuaternario al Reciente y cuyos productos tienen una composición primordialmente basáltica.

Las rocas de origen sedimentario continental están constituidas por sedimentos lacustres que gradúan hacia las partes altas a arenas, gravas y conglomerados intercalados con tobas, riolíticas y son cubiertas por los basaltos 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 Fig. 6.7 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).

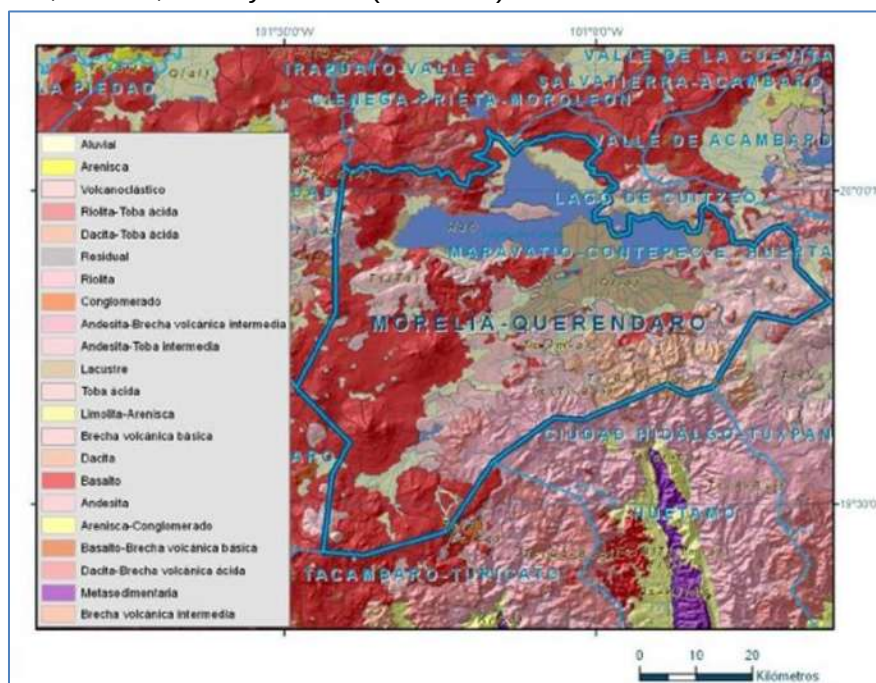


Fig. 6.7 Geología del acuífero Morelia-Queréndaro. Fuente CONAGUA 2009.

6.3.4 Hidrología

La red hidrográfica está constituida por tres ríos, los cuales son: el río Grande, el río Chiquito y el río la Hoya o arroyo de Tierras. El río Grande de Morelia nace en la unión de varios arroyos en la zona montañosa que se extiende al sur de la ciudad y mantienen un curso suroeste-noreste, además recibe varios tributarios por su margen derecha, antes de cruzar por la ciudad de Morelia. En Zacapendo, el río cambia su dirección bruscamente hacia el norte, entrando a la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, para desembocar en el lago de Cuitzeo.

La escorrentía del río Chiquito y la Hoya o arroyo de Tierras, corren de sureste a noreste. Estos nacen en la Sierra de Mil Cumbres y se unen al río Grande después de recorrer su tramo urbano.

Sus arroyos más conocidos son La Zarza y La Pitaya. Su presa más importante es la de Cointzio, aunque cuenta con otras menores como las de Umécuaro, Laja Caliente y La Mintzita, esta última empleada principalmente para abastecer a la ciudad de Morelia. También son importantes sus manantiales de aguas termales que son aprovechados como balnearios, como el de Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas. Existen amplias llanuras de inundación alrededor de su principal cuerpo de agua, la laguna de Cuitzeo, que confirman la reducción del nivel de las aguas; situación observada en todos los cuerpos de agua del país.

En esta porción del estado se localiza el mayor número de obras de almacenamiento, entre las que sobresalen: la de Cointzio sobre el río Grande de Morelia, que tiene una capacidad total de 84'800,000 m³ y es empleada para abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia.

6.4 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 encuentra ubicada a 13 km aguas arriba de la ciudad de Morelia, actualmente cuenta con la capacidad de almacenar 79.23 millones de m³ (CONAGUA 2009), y se conducen por el cauce del río Grande de Morelia hasta desembocar al lago de Cuitzeo. El volumen del embalse Cointzio en los últimos 30 años ha disminuido en comparación con el volumen obtenido desde su inauguración, cuando tenía la capacidad de almacenar 84.8 millones de m³.

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 infraestructura consiste en: una presa de almacenamiento, Cointzio, 6 presas derivadoras, 14 plantas de bombeo, 109 pozos profundos, 280.6 Km. de canales, 292.6 Km de drenes, 549.9 Km. de caminos y 882 estructuras.

Presa Cointzio: Esta presa se construyó sobre el río Grande de Morelia, es una presa de usos múltiples: abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía eléctrica y regulación de la corriente del río. Las principales características de esta presa son:

El vaso actualmente cuenta con una capacidad total de 79.23 Hm³, una capacidad útil de 74.8 Hm³ y una capacidad de azolves de 15.0 Hm³.

La obra de toma es una tubería a presión alojada en la margen derecha del río, la cual consiste en un túnel. La carga máxima es de 3.80 m. El gasto máximo es de 12.0 m³/s. Y una superficie regable es 14,888 Has.

La obra de excedencias es un vertedor controlado por cinco compuertas radiales que vierte a un canal. La carga máxima es de 3.50 mts. La longitud de la cresta es 29.90 mts. Y el gasto máximo es de 600 m³/s.

De la obra de toma existe una derivación que alimenta mediante un acueducto de 12.4 km a la planta potabilizadora de Morelia.

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 2009)

También se dispone de un sistema de drenaje vertical compuesto por 14 plantas de bombeo que utilizan 36 equipos eléctricos, para el desalojo de aguas pluviales y desfuegos de áreas más bajas a los cauces naturales.

6.5 Demanda urbana de Morelia

Para la demanda urbana de la ciudad de Morelia, el Organismo Operador tiene distintas concesiones de agua tanto de origen superficial como subterráneo, tal como se muestra a continuación:

- a. *Superficiales*: aquí podemos encontrar el agua que viene de la presa de Coitzio que tiene una producción de 600 lps.
- b. *Subterránea*: por medio de manantiales con una producción promedio de 849 lps y por el acuífero Morelia-Queréndaro a través de 91 pozos profundos distribuidos por toda la mancha urbana de la ciudad teniendo una extracción media de 1588 lps.

La demanda de Morelia se calculará desde el año 2010 proyectándola hasta el 2100. Y como ésta es función de la población que hay en la ciudad, para calcularla se aplicaran métodos analíticos empleando los datos estadísticos recopilados del INEGI y del OOAPAS.

6.5.1 Análisis y proyección de la Demanda Urbana.

Para el cálculo de la población a futuro utilizaremos los siguientes métodos de evaluación, mismos que se describirán más adelante:

- a) Método aritmético
- b) Método geométrico
- c) Método del Mínimo Cuadrado
- d) Método de la curva exponencial
- e) Método por tomas domesticas

6.5.1.1 Método aritmético

En este método se considera que el incremento de población es constante y consiste en obtener el promedio anual en años anteriores y aplicarlos al futuro en base a las formulas siguientes:

$$P_f = P_a + IN$$

Dónde:

P_f = Población Futura

P_a = Población Actual

I = Incremento Promedio: $\sum \frac{I_D}{N_D}$

$$I_D = \frac{[P_D - P(D - 1)]}{N}$$

Dónde:

I_D = Incremento Decenal

P_D = Población de cada Decena

$P(D-1)$ = Población de la Decena Anterior

N = Años transcurridos desde P_D Y $P(D-1)$

Tabla 6.3 Método Aritmetico

No.	Año	Población	Incremento
1	1960	153,481	
2	1970	218,083	6460.2
3	1980	353,055	13497.2
4	1990	489,756	13670.1
5	1995	578,061	17661
6	2000	620,532	8494.2
7	2005	684,145	12722.6
8	2010	729,757	9122.4
			81627.7

$$i = 11661.1$$

Aplicando la fórmula: $P_f = P_a + IN$

Tabla 6.4 Resultados de la población futura por el método aritmético.

2010	729,757 Hab.	2030	962,979 Hab.	2070	1,429,423 Hab.
2011	741,418 Hab.	2035	1,021,285 Hab.	2075	1,487,729 Hab.
2012	753,079 Hab.	2040	1,079,590 Hab.	2080	1,546,034 Hab.
2013	764,740 Hab.	2045	1,137,896 Hab.	2085	1,604,340 Hab.
2014	776,401 Hab.	2050	1,196,201 Hab.	2090	1,662,645 Hab.
2015	788,063 Hab.	2055	1,254,507 Hab.	2095	1,720,951 Hab.
2020	846,368 Hab.	2060	1,312,812 Hab.	2100	1,779,256 Hab.
2025	904,674 Hab.	2065	1,371,118 Hab.		

6.5.1.2 Método geométrico

El principio en que se basa este método es el de considerar que la población tendrá un incremento análogo, al que sigue un capital aumentado en sus intereses, esto siguiendo la fórmula de interés compuesto en el que el rédito es el factor de crecimiento.

$$P_f = P_a(1 + r)^n$$

Dónde:

P_f = Población Futura

P_a = Población Actual

r = Tasa de Crecimiento

n = Años Transcurrido

$$(1 + r) = \left[\frac{P_D}{P(D-1)} \right]^{\left(\frac{1}{n}\right)}$$

Dónde:

P_D = Población de cada Decena

$P(D-1)$ = Población de la Decena Anterior

n = Años transcurridos desde P_D Y $P(D-1)$

Tabla 6.5 Método geométrico

No.	Año	Población	Incremento
1	1960	153,481	(1 + r)
2	1970	218,083	1.03575
3	1980	353,055	1.04935
4	1990	489,756	1.03327
5	1995	578,061	1.03371
6	2000	620,532	1.01428
7	2005	684,145	1.01971
8	2010	729,757	1.01299
			7.19907

$$(1 + r)_{Prom} = 1.03778472$$

Aplicando la fórmula: $P_f = P_a(1 + r)^n$

Tabla 6.6 Resultados de la población futura por el método geométrico.

2010	729,757 Hab.	2030	1,278,636 Hab.	2070	3,925,398 Hab.
2011	750,510 Hab.	2035	1,471,089 Hab.	2075	4,516,228 Hab.
2012	771,854 Hab.	2040	1,692,509 Hab.	2080	5,195,986 Hab.
2013	793,804 Hab.	2045	1,947,256 Hab.	2085	5,978,058 Hab.
2014	816,379 Hab.	2050	2,240,347 Hab.	2090	6,877,843 Hab.
2015	839,596 Hab.	2055	2,577,552 Hab.	2095	7,913,058 Hab.
2020	965,968 Hab.	2060	2,965,511 Hab.	2100	9,104,089 Hab.
2025	1,111,360 Hab.	2065	3,411,863 Hab.		

6.5.1.3 Método mínimo cuadrado

Sustituyendo en la fórmula del método aritmético; $P_f = P_a + IN$, lo siguiente:

$P_f = Y_c$ = Número de años a proyectar

$P_a = b$

$I = a$

$N = x$

Obtenemos:

$$Y_c = a + bx$$

Que es la función de regresión lineal, para la línea recta, donde las siguientes ecuaciones sirven para obtener “a” y “b”.

$$b = \frac{N \sum XY \cdot \sum X \sum Y}{N \sum X^2 \cdot (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{\sum Y \cdot b \sum X}{N}$$

Para aplicar estas fórmulas es necesario determinar la siguiente tabla.

Tabla 6.7 Método mínimo cuadrado.

No.	Año 1950	Población (Y _o)	X _o	X _o ²	X _o Y _o
1	1960	153,481	10	100	1,534,810
2	1970	218,083	20	400	4,361,660
3	1980	353,055	30	900	10,591,650
4	1990	489,756	40	1,600	19,590,240
5	1995	578,061	45	2,025	26,012,745
6	2000	620,532	50	2,500	31,026,600
7	2005	684,145	55	3,025	37,627,975
8	2010	729,757	60	3,600	43,785,420
Σ =		3,826,870	310	14,150	174,531,100

Sustituyendo los valores de la tabla en las formulas anteriores obtenemos “a” y “b”.

$$b = 12275.97076$$

$$a = 2664.88$$

Aplicando la fórmula: $Y_C = a + bx$

Tabla 6.8 Resultados de la población futura por el método mínimo cuadrado.

2010	729,757 Hab.	2030	984,743 Hab.	2070	1,475,781 Hab.
2011	751,499 Hab.	2035	1,046,122 Hab.	2075	1,537,161 Hab.
2012	763,775 Hab.	2040	1,107,502 Hab.	2080	1,598,541 Hab.
2013	776,051 Hab.	2045	1,168,882 Hab.	2085	1,659,921 Hab.
2014	788,327 Hab.	2050	1,230,262 Hab.	2090	1,721,301 Hab.
2015	800,603 Hab.	2055	1,291,642 Hab.	2095	1,782,681 Hab.
2020	861,983 Hab.	2060	1,353,022 Hab.	2100	1,844,060 Hab.
2025	923,363 Hab.	2065	1,414,402 Hab.		

6.5.1.4 Método de la curva exponencial

Sustituyendo en la fórmula del método geométrico; $P_f = P_a(1 + r)^n$, lo siguiente :

Dónde:

$$P_f = Y$$

$$P_a = a$$

$$(1 + r) = b$$

$$N = t$$

Obtenemos:

$$Y = a \cdot b^t$$

Esta es la fórmula de regresión lineal, para la curva exponencial, donde tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\log b = \frac{n \sum t \log Y_o - \sum t \sum \log Y_o}{n \sum t^2 - (\sum t)^2}$$

$$\log a = \left(\frac{\sum \log Y_o}{n} \right) - \left(\frac{\sum t}{n} \right) \log b$$

Para aplicar estas 2 fórmulas es necesario determinar la siguiente tabla.

Tabla 6.9 Método de la curva exponencial.

No.	Año 1950	Población Y_0	Log Y_0	t	t^2	t log Y_0
1	1960	153,481	5.18605462	10	100	51.8605462
2	1970	218,083	5.33862181	20	400	106.772436
3	1980	353,055	5.54784237	30	900	166.435271
4	1990	489,756	5.68997977	40	1600	227.599191
5	1995	578,061	5.76197367	45	2025	259.288815
6	2000	620,532	5.79276418	50	2500	289.638209
7	2005	684,145	5.83514816	55	3025	320.933149
8	2010	729,757	5.86317827	60	3600	351.790696
$\Sigma =$		3,826,870	45	310	14,150	1,774.3183

Sustituyendo en las fórmulas de “log a” y “log b”:

$$\log b = 0.0140188 \quad b = 1.032806$$

$$\log a = 5.083715624 \quad a = 121,259.4582$$

Sustituyendo valores en la ecuación; $Y = a \cdot b^t$ obtenemos lo siguiente.

Tabla 6.10 Resultados de la población futura por el método de la curva exponencial..

2010	729,757 Hab.	2030	1,604,066 Hab.	2070	5,834,121 Hab.
2011	868,689 Hab.	2035	1,885,022 Hab.	2075	6,855,981 Hab.
2012	897,187 Hab.	2040	2,215,187 Hab.	2080	8,056,822 Hab.
2013	926,621 Hab.	2045	2,603,183 Hab.	2085	9,467,993 Hab.
2014	957,020 Hab.	2050	3,059,136 Hab.	2090	11,126,334 Hab.
2015	988,416 Hab.	2055	3,594,951 Hab.	2095	13,075,137 Hab.
2020	1,161,539 Hab.	2060	4,224,615 Hab.	2100	15,365,277 Hab.
2025	1,364,985 Hab.	2065	4,964,566 Hab.		

Análisis comparativo de estos cuatro métodos para calcular la población futura

Tabla 6.11 Análisis comparativo de los métodos de cálculo de la población.

Método	2011	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Aritmetico	741,418	846,368	962,979	1,079,590	1,196,201	1,312,812	1,429,423	1,546,034	1,662,645	1,779,256
Geometrico	750,510	965,968	1,278,636	1,692,509	2,240,347	2,965,511	3,925,398	5,195,986	6,877,843	9,104,089
Minimo Cuadrado	751,499	861,983	984,743	1,107,502	1,230,262	1,353,022	1,475,781	1,598,541	1,721,301	1,844,060
Curva Exponencial	868,689	1,161,539	1,604,066	2,215,187	3,059,136	4,224,615	5,834,121	8,056,822	11,126,334	15,365,277
Suma=	3,112,117	3,835,857	4,830,423	6,094,789	7,725,946	9,855,959	12,664,724	16,397,383	21,388,122	28,092,682
Promedio=	778,029	958,964	1,207,606	1,523,697	1,931,486	2,463,990	3,166,181	4,099,346	5,347,030	7,023,171
Población Proy=	778,029	958,964	1,207,606	1,523,697	1,931,486	2,463,990	3,166,181	4,099,346	5,347,030	7,023,171

Año	Método				Promedio
	Aritmetico	Geometrico	Minimo Cuadrado	Curva Exponencial	
1960					153,481
1970					218,083
1980					353,055
1990					489,756
1995					578,061
2000					620,532
2005					684,145
2010	729,757	729,757	729,757	729,757	729,757
2015	788,063	839,596	800,603	988,416	854,169
2020	846,368	965,968	861,983	1,161,539	958,964
2025	904,674	1,111,360	923,363	1,364,985	1,076,095
2030	962,979	1,278,636	984,743	1,604,066	1,207,606
2035	1,021,285	1,471,089	1,046,122	1,885,022	1,355,879
2040	1,079,590	1,692,509	1,107,502	2,215,187	1,523,697
2045	1,137,896	1,947,256	1,168,882	2,603,183	1,714,304
2050	1,196,201	2,240,347	1,230,262	3,059,136	1,931,486
2055	1,254,507	2,577,552	1,291,642	3,594,951	2,179,663
2060	1,312,812	2,965,511	1,353,022	4,224,615	2,463,990
2065	1,371,118	3,411,863	1,414,402	4,964,566	2,790,487
2070	1,429,423	3,925,398	1,475,781	5,834,121	3,166,181
2075	1,487,729	4,516,228	1,537,161	6,855,981	3,599,275
2080	1,546,034	5,195,986	1,598,541	8,056,822	4,099,346
2085	1,604,340	5,978,058	1,659,921	9,467,993	4,677,578
2090	1,662,645	6,877,843	1,721,301	11,126,334	5,347,030
2095	1,720,951	7,913,058	1,782,681	13,075,137	6,122,956
2100	1,779,256	9,104,089	1,844,060	15,365,277	7,023,171

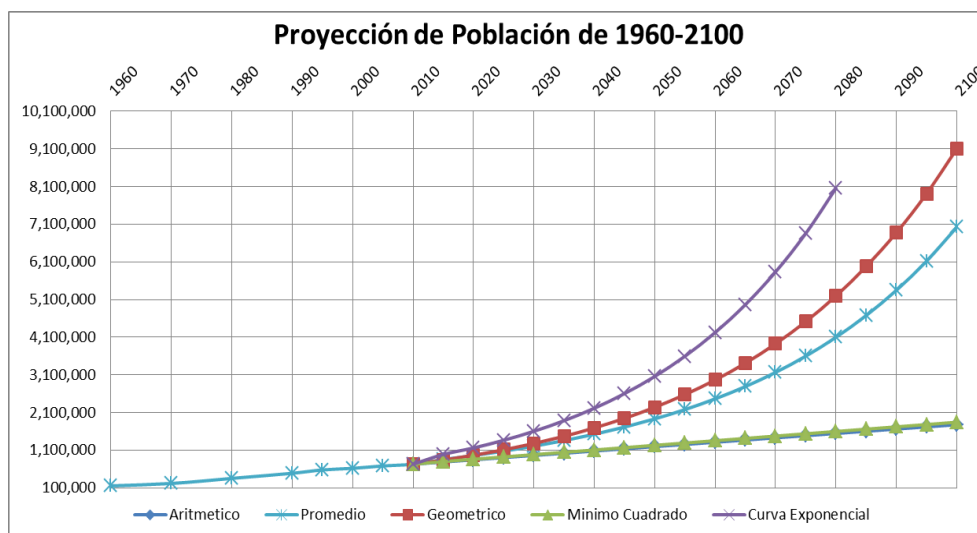


Fig. 6.8 Grafica de comparación de los métodos de cálculo de población proyectada.

Otra manera de obtener la población futura de la ciudad es a partir de tomas domésticas que se tengan registradas en el organismo operador (OOAPAS)

Número de tomas registradas de tipo doméstico = 190,434 (año 2010)

Cobertura del servicio de agua potable = 91%

Número de habitantes por vivienda = 3.8 (Índice de Hacinamiento según INEGI)

$$P_{2010} = \frac{\text{No. de Tomas domésticas} \times \text{Índice de Hacinamiento}}{\text{Cobertura del servicio de Agua Potable}}$$

$$P_{2010} = \frac{190434 \times 3.8}{0.91} = 795219 \text{ habitantes.}$$

A manera de síntesis, la aplicación de cualquier método para predecir la población futura solo dan resultados orientados, sin embargo al efectuar un análisis de todos los resultados, se puede concluir que los datos más reales o acertados, son los presentados por OOAPAS siendo éste el que se tomó como base para la determinación final de la población para el año 2010 que es de 795,219 hab.

De todos los cálculos presentados, se estima que la tendencia del crecimiento más apropiada para el caso de la ciudad de Morelia, es la resultante de aplicar el criterio de interés compuesto o método geométrico con la tasa de crecimiento anual que maneja el INEGI para la ciudad que es de 2.80%.

Teniendo como base la población del año 2002 para la ciudad de Morelia de 795.219 habitantes y utilizando el método geométrico se tiene los resultados siguientes:

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA PARA LA CIUDAD MORELIA, MICH.

CONCEPTO	2010	2013	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Población Total	795,219	816,884	831,654	869,758	951,284	1,040,451	1,137,977	1,244,644	1,361,309	1,488,910	1,628,471	1,781,114
Crecimiento actual	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%	2.80%
Índice de hacinamiento	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8

Agua Potable

	2010	2013	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Cobertura doméstica	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%	91.0%
Población servida	723,649	743,364	756,805	791,480	865,668	946,811	1,035,559	1,132,626	1,238,791	1,354,908	1,481,908	1,620,814
Población sin servicio	71,570	73,520	74,849	78,278	85,616	93,641	102,418	112,018	122,518	134,002	146,562	160,300
Tomas potenciales domésticas	209,268	214,969	218,856	228,884	250,338	273,803	299,468	327,538	358,239	391,818	428,545	468,714
Tomas domésticas servidas	190,434	195,622	199,159	208,284	227,807	249,161	272,515	298,059	325,998	356,555	389,976	426,530
Pérdidas físicas	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Eficiencia física	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Demanda de agua en millones de metros cúbicos

	2010	2013	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Doméstico	46.22	47.48	48.34	50.56	55.29	60.48	66.15	72.35	79.13	86.54	94.66	103.53
Comercial	2.81	2.89	2.94	3.07	3.36	3.68	4.02	4.40	4.81	5.26	5.75	6.29
Industrial	0.37	0.38	0.38	0.40	0.44	0.48	0.53	0.58	0.63	0.69	0.75	0.82
Población sin servicio	1.96	2.01	2.05	2.14	2.34	2.56	2.80	3.07	3.35	3.67	4.01	4.39
total sin pérdidas físicas	51.36	52.76	53.71	56.17	61.44	67.20	73.50	80.39	87.92	96.16	105.18	115.03
total con pérdidas físicas	102.72	105.52	107.43	112.35	122.88	134.40	146.99	160.77	175.84	192.32	210.35	230.07

Demanda de agua en litros por segundo

	2010	2013	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Doméstico	1465.72	1505.66	1532.88	1603.11	1753.38	1917.73	2097.49	2294.09	2509.13	2744.32	3001.55	3282.90
Comercial	89.09	91.52	93.17	97.44	106.57	116.56	127.49	139.44	152.51	166.81	182.44	199.54
Industrial	11.66	11.98	12.19	12.75	13.95	15.26	16.69	18.25	19.96	21.83	23.88	26.12
Población sin servicio	62.13	63.82	64.97	67.95	74.32	81.29	88.90	97.24	106.35	116.32	127.22	139.15
total sin pérdidas físicas	1628.60	1672.97	1703.22	1781.26	1948.22	2130.83	2330.57	2549.02	2787.95	3049.27	3335.09	3647.70
total con pérdidas físicas	3257.20	3345.94	3406.44	3562.51	3896.44	4261.67	4661.13	5098.04	5575.90	6098.55	6670.19	7295.41

Dotación de Agua en litros/habitante/día

	2010	2013	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Dotación por habitante servido	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89	388.89
Dotación por habitante total	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89	353.89

De los cálculos anteriores, la demanda de agua para la ciudad de Morelia es de 1628 lps, sin contar las pérdidas físicas que existen en la red de distribución; obteniéndose esta en base al número de tomas domésticas, comerciales e industriales registradas por OOAPAS en el año 2010 y con los consumos promedios para cada toma. Y se estima que la demanda para el año 2100 sea de 3647 lps, esta estimación fue hecha en base a la tasa de crecimiento de 2.80% que existe en la ciudad y al aplicar la fórmula de interés compuesto o método geométrico que es la que mejor se desempeñó en el análisis. Ahora para considerar la demanda con pérdidas físicas en el sistema será de la siguiente manera:

Se tiene contemplado que la eficiencia de la red de distribución es de 50%, es decir, que la mitad del agua suministrada se pierde debido a fugas en el sistema.

Entonces el agua que realmente se necesita para satisfacer la demanda urbana debe ser:

$$Demanda\ Total = 1628.60 \times 0.50 = 3257.20\ lps$$

De manera práctica, se necesita que la demanda sea considerada de 3257.20 lps de agua para que con el 50% de pérdidas quede en 1628.60 lps requeridos por la ciudad. Ahora la demanda futura para cada uno de los años se realiza de la misma manera llegando hasta el 2100, año en donde considerando perdidas físicas será 7295.41 lps para poder llegar a satisfacer la demanda prevista.

6.5.2 Infraestructura.

Agua potable:

- Presa Cointzio.
- Manantial Mintizita.
- Manantial San Miguel.
- Manantiales El Salto y La Higuera.
- 91 Pozos.

Líneas de Conducción:

- Presa Cointzio a la Planta Potabilizadora con una longitud de 12,400 m.
- Manantial la Mintzita al cárcamo de Bombeo, con una longitud de 4,400 m.
- Cárcamo de Bombeo la Mintzita a la Planta potabilizadora, con una longitud de 6000 m.
- Cárcamo de Bombeo al Tanque Tzindurio, con una longitud de 1490 m.
- Manantial San Miguel a la Planta Potabilizadora, con una longitud de 17,700 m.

Potabilización:

- Planta Potabilizadora, construida en 1948 y 1952 en cooperación con la Secretaría de Recursos Hidráulicos y el Gobierno del Estado de Michoacán, con una capacidad de 275 lps para 82,500 habitantes y una ampliación futura de 450 lps

para satisfacer una demanda aproximada de 153,000 habitantes. En 1970 se construyó un tercer tanque clarifloculador y en 1978 se construyó el tanque principal del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Morelia con una capacidad de 6,500 m³. En 1985 se construyó un cuarto tanque sedimentador. No obstante la antigüedad de las instalaciones, la planta potabilizadora se encuentra en posibilidades de seguir operando normalmente y seguir abasteciendo oportunamente a la zona central de la ciudad de Morelia, mejorando los equipos e instalaciones, dándoles mantenimiento continuamente y preocupándose por el buen funcionamiento de los mismos. El tratamiento que recibe el agua que llega a la planta es el siguiente: coagulación química, floculación, sedimentación, filtración y desinfección con cloro.

- El cárcamo de bombeo de la Mintzita está instalado un equipo de dosificación de gas cloro, para que el agua rebombada reciba su desinfección.
- El agua que se extrae de pozos recibe tratamiento a base de desinfección con cloro antes de su distribución a los usuarios.

Distribución:

La cobertura de la red de distribución de agua potable se controla en cuatro sectores que cubren a la ciudad de Morelia, siendo estos siguientes:

- Sector República.- comprende la parte noroeste de la ciudad y a su vez este sector se divide en Sector República Norte y sector República Poniente.
- Sector Revolución.- abarca la parte noreste y a su vez este sector es dividido en sector Revolución Norte y sector Revolución Oriente.
- Sector Nueva España.- su radio de influencia es la parte sureste.
- Sector Independencia.- cubre el lado suroeste de la ciudad.

El periférico marca los límites superiores de todos los sectores y los límites entre cada sector lo constituyen la Avenida Morelos que corre de sus a Norte y la Avenida Francisco I. Madero que va de oriente a poniente.

Regulación:

- La capacidad instalada de regulación del agua potable es llevada a cabo por medio de 93 tanques algunos de ellos son de concreto y otros de metal. Éstos están ubicados en las colonias de la ciudad cuyas capacidades oscilan entre los 10 - 6,500 m³ y estos pueden ser enterrados, superficiales o elevados.

6.5.3 Problemática de Operación Actual y Futuro.

- Se conoce el comportamiento de los gastos de las fuentes de captación (manantiales, pozos), aunque se cuente con datos, éstos no son lo suficientemente confiables para la realizar la planeación de la oferta.
- No se lleva un control de fugas y pérdidas físicas de agua en las redes de distribución.

- El Organismo no cuenta con un esquema funcional que responda a las necesidades de operación, ya que denota la ausencia de áreas como son planeación que por las características y personalidad jurídica adquirida por el Organismo debe ser incorporada en el plazo inmediato.
- No se tiene un pleno conocimiento de las condiciones físicas de las instalaciones, lo cual se debe a que no se lleva una programación adecuada de la conservación y mantenimiento de las mismas, para poder ejecutar su rehabilitación y/o sustitución.
- No se cuenta con un programa de conservación y mantenimiento preventivo de las instalaciones y equipos electromecánicos, situación que puede repercutir en el deterioro de las instalaciones y consecuentemente en altos volúmenes de pérdidas físicas.
- El mantenimiento y la seguridad de las fuentes de abastecimiento superficial no existe.
- Las líneas de conducción formadas por canales, no cuentan con las medidas de seguridad necesarias, ni están diseñadas adecuadamente, para las condiciones actuales y futuras.
- La red de distribución de la zona centro de la ciudad tiene operando más de 40 años, por lo que su vida útil ya terminó, ocasionando con esto la aparición de múltiples fugas en mayor proporción que en el resto de la ciudad.
- En general el servicio no es continuo, recurriéndose al tanteo, lo que requiere una gran cantidad de movimientos de válvulas.

6.5.4 Propuestas para la Mejora del Suministro.

- a. Desarrollar campañas de difusión para que la población cuide el agua, consuma sólo la necesaria y no la desperdicie.
- b. Elaborar programas de macromedición, instalación y sustitución de micromedidores, conservación y mantenimiento de la infraestructura, monitoreo de la calidad de agua potable, detención y control de fugas, adquirir equipo necesario y dar el mantenimiento adecuado a los micromedidores.
- c. Aumento de la capacidad de las fuentes de abastecimiento, lo cual se puede lograr recuperando los gastos que actualmente se tienen concesionados a una empresa papelera (para 2013 se prevé la utilización de agua reciclada proveniente de una planta potabilizadora en la Mintzita) y para riego.
 1. Presa de Cointzio: eficientar la obra de toma implementando un equipo de macromedición, esto con el fin de conocer los caudales reales de explotación en el momento que se desee. Utilizar el agua que en la actualidad se encuentra concesionada para riego que es de 500 lps, ésta se intercambiaría por agua tratada proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales. Estos 500 lps sumados a los 600 lps que se extraen actualmente para agua potable, darían un total de 1100 lps.
 2. Manantial Mitzita: es necesario construir la obra de toma adecuada para captar el 100 % del gasto concesionado, además de la implementación de macromedición con registros continuos de caudal..

3. Manantial San Miguel: también debe de implementarse el sistema de macromedición, pero también hay que realizar la limpieza adecuada del área del manantial para poder captar un mayor gasto y construir la obra de captación acorde con las necesidades.
4. Rehabilitación de pozos que actualmente se tienen fuera de operación e implementar un sistema de macromedición para conocer el gasto real producido en cada uno de ellos.
 - i. En la zona de los manantiales deberá construirse una cerca perimetral para evitar la contaminación de los mismos.
 - ii. La construcción de un embalse en el río Chiquito aguas arriba por la altura de los filtros viejos.
 - iii. Las acciones anteriores deben realizarse en el corto plazo; para lograr el abastecimiento futuro.

7 Escenario de mitigación al cambio climático.

7.1 Modelo de Gestión de la Cuenca Existente.

7.1.1 Descripción del Esquema de Simulación.

La simulación de la demanda urbana de Morelia, se implantará en un modelo previo de simulación de la gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Grande, ya que la ciudad de Morelia está incluida en la cuenca del río Grande y este modelo tiene como objetivo simular el comportamiento de la cuenca, basado en antecedentes históricos registrados y los elementos que los constituyen. Este modelo es útil para la fase de planeación de la cuenca, ya que permite evaluar las reglas de operación históricas y constituye un eficiente sistema de apoyo a la toma de decisiones relacionados con la planeación. Razón por lo cual, para la simulación de la demanda urbana de Morelia se tomará como base el esquema de simulación de la cuenca del río Grande. A continuación se dará una descripción de los elementos que forman este esquema de simulación:

A partir de información disponible, se ha planteado el esquema conceptual de la cuenca del río Grande de Morelia. Para el diseño del esquema de la cuenca se aprovechó la posibilidad de diseño gráfico asistido del Sistema de Apoyo a la Decisión AQUATOOL/SIMGES que permite elaborar el esquema con una estructura lo más aproximado a la posición geográfica real.

El esquema de la cuenca del río Grande de Morelia adoptado para la simulación está compuesto por embalses, tramos de río con y sin recarga al acuífero, tomas de demandas, demandas consuntivas, acuífero de autovalores y nodos que representan las tomas, confluencias y bifurcaciones. Estos elementos se describen a continuación:

- El nudo 1 es de tipo embalse y corresponde al embalse Cointzio. Se considera una aportación de agua superficial correspondiente a la cuenca vertiente del mismo (desde el nacimiento del río Grande hasta el Embalse) denominada “Aportación Cointzio. En este elemento tipo embalse se presenta una toma para suministrar agua a la demanda urbana de la ciudad de Morelia (superficial) la cual suministra 600 lps constantes. El embalse tiene un volumen inicial de 70 hm³ y un caudal máximo de sueltas de 50 hm³/ mes y sus características físicas son las que a continuación se presentan:
- El nodo 1 “Embalse Cointzio”. Las características que considera un embalse son:
 - a. Evaporación
 - b. cota-superficie-volumen.
 - c. Volumen máximo de simulación
 - d. Volumen mínimo de simulación
 - e. Volumen objetivo de simulación
- Además una aportación de agua superficial entra al sistema correspondiente a la cabecera de la cuenca (desde el nacimiento del río Grande de Morelia hasta el Embalse de Cointzio) denominada “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. (Ver tesis “Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos” realizada por el Ing. Joel Hernández Bedolla dirigida por la Dra. Sonia Tatiana Sanchez Quispe, UMSNH).

Tabla 7.1 Superficie-cota-volumen del embalse Cointzio.

Cota	Superficie (Ha)	Volumen (Hm ³)
1972.31	47.4891	0.9065
1975	63.0975	2.3896
1978	93.4780	4.7510
1981	128.0265	8.0675
1984	186.3697	12.8531
1987	234.0469	19.1495
1990	317.4530	27.3147
1995.97	463.2846	50.8356
1999.47	551.2872	68.5197
2001.32	604.7454	79.2328

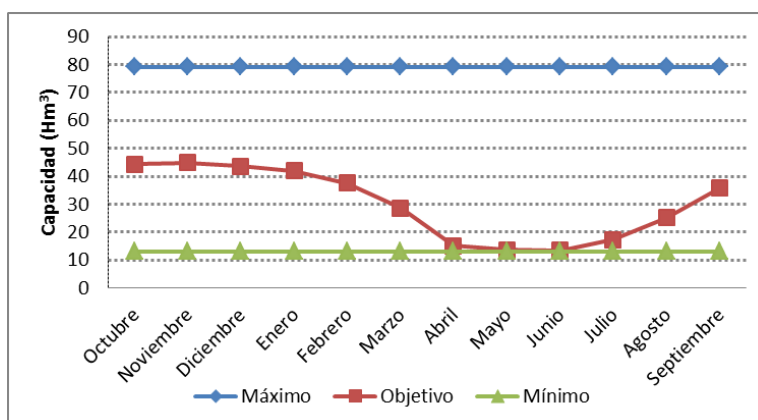


Fig. 7.1 Volumen Máximo-Objetivo-Mínimo de la presa Cointzio.

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. Este nudo 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 No. 020 Morelia-Queréndaro.

Elemento tipo toma "Canal La Huerta" esta toma sale de la derivadora la Huerta, la cual distribuye parte del agua de riego a 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 nudo 3 se localiza la "Derivadora Cointzio", por donde se suministra la parte complementaria de agua a la demanda agrícola del Módulo I a través del canal Cointzio, ubicado en la margen izquierda del Río Grande.

El tramo de río denominado "Grande 3" se considera a partir de la Derivadora Cointzio (nudo 3) hasta el punto donde descarga aguas residuales la planta industrial conocida como CEPAMISA o Crisoba (nudo 4).

El manantial de La Mintzita y San Miguel, es un manantial que se representa en el esquema como "Acuífero Mintzita", de donde se extrae agua para satisfacer la demanda CEPAMISA (500 lts/seg) y la demanda urbana (aproximadamente 1000 lps), los dos manantiales suministran a la demanda urbana un poco más de 800 lps. Esta toma se representa por un bombeo que va del acuífero al nudo 11 o nudo ficticio (para suministrar agua de un acuífero a la demanda por medio de bombeo, el modelo requiere de este tipo de elementos para que pueda hacer uso del agua bombeada).

El nudo 11 se une al sistema, mediante una conducción ficticia denominada "ENLACE". Del nudo 11 se representan 2 tomas subterráneas de agua para las demandas CEPAMISA y urbana.

El tramo ENLACE es una conducción ficticia con caudal circulante que se une al sistema en el nudo 4.

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 de CEPAMISA), hasta el nudo 5, punto donde se ubica la aportación proveniente 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

Toma "Canal la Goleta". Este canal sale de la margen izquierda del río Grande y es el encargado de distribuir el agua de uso agrícola a una parte del Módulo 2.

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 (nudo7), hasta la Derivadora Quirio (nudo 8).

El nudo 8 representa la "Derivadora Quirio" por medio de la cual se abastece de agua a la demanda agrícola del Módulo 3, a través del canal Joconoles.

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.

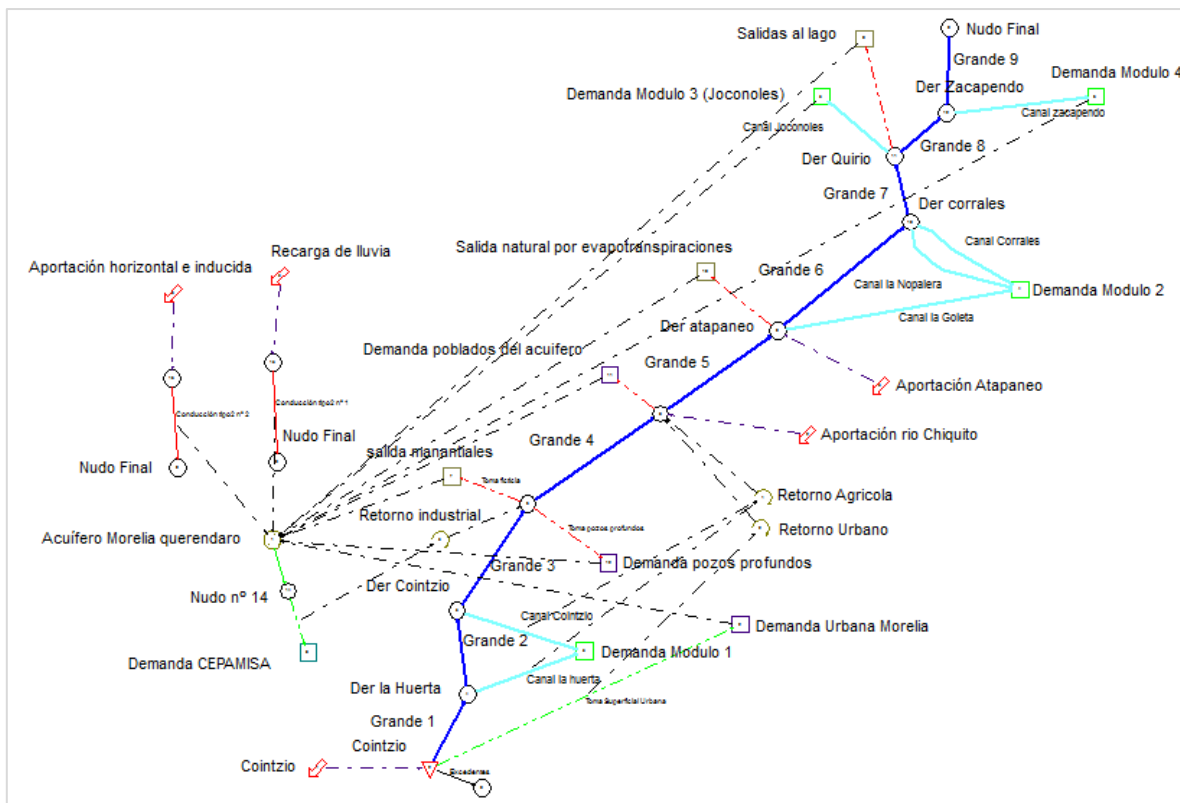
Tramo de río "Grande 8", es la continuación del río Grande desde la Derivadora Quirio (nudo 8) hasta la Derivadora Zacapendo (nudo 9).

En el nudo 9 se ubica la “Derivadora Zacapendo” por medio de la cual se suministra agua para la demanda agrícola del Módulo 4, a través del canal Zacapendo y de igual manera que el Módulo 3 una parte de la demanda es abastecida de las aguas subterráneas del acuífero Morelia-Queréndaro.

Tramo de río "Grande 9". Este tramo es la continuación del río Grande de Morelia desde la Derivadora Zacapendo hasta el punto donde desemboca el lago de Cuitzeo.

El nudo final es la desembocadura del río Grande de Morelia en el "Lago de Cuitzeo".

Una vez analizado cada tramo de la cuenca del río Grande de Morelia se determinó el esquema de simulación que se muestra en la siguiente figura:



7.1.2 Desventajas del Esquema de Simulación Respecto a la Demanda Urbana.

123

- No toma en cuenta todas las fuentes de abastecimiento que hay para satisfacer la demanda urbana.
- No representa al detalle la situación actual de la ciudad de Morelia para un adecuado análisis de la problemática.
- No es posible realizar una simulación para un escenario futuro.
- Su representación en el esquema no permite conocer el funcionamiento de la demanda urbana.
- Los datos de las demandas y gastos en las fuentes de abastecimiento no están actualizados.
- No toma en cuenta las pérdidas físicas de distribución de agua a la demanda urbana.

Por estos motivos el esquema de simulación será modificado únicamente en lo que correspondiente a la demanda y tomas de la ciudad de Morelia, sustituyéndolos por nuevos elementos descritos más adelante. Los demás elemento quedarán sin modificaciones.

Cabe indicar que el esquema existente tuvo como objetivo proponer las reglas de operación del embalse Cointzio para la demanda agrícola, por lo que era necesario representar la conducción del embalse Cointzio hacia la demanda urbana.

7.2 Modificaciones del Modelo Existente.

Las modificaciones que se realizaron al modelo de simulación fue una tarea de eliminar elementos y reemplazar con uno o más elementos de acuerdo a la situación actual de suministro de la demanda urbana.

Se eliminaron los siguientes elementos:

1. Toma de nombre “Toma Superficial Urbana” que va desde el embalse Cointzio a la Demanda Urbana de Morelia.
2. Toma de nombre “Toma Subterránea Urbana” que va desde el Nudo 11(ficticio) a la Demanda Urbana de Morelia.
3. Demanda de nombre “Demanda Urbana Morelia”.

Se reemplazaron dichas tomas por más de una conducción, agregando nuevos elementos de control, así como datos recientes al 2010 requeridos para actualizar la nueva demanda, e incluyendo pérdidas por distribución.

Para la modificación del esquema de simulación se han agregado los siguientes elementos.

1. Conducción tipo 1 de nombre “Cointzio-Planta” el cual representa la línea de conducción que va desde el embalse Cointzio al “Nudo 15”, el cual transporta un gasto constante de 600 lps (1.577 Hm³/mes).
2. Nudo 15. Sirve para derivar dos gastos, uno que se distribuye hacia la “Planta Potabilizadora” y otro hacia la “Demanda Clandestina”.

3. “Toma Clandestina” la cual alimentará a la “Demanda Clandestina” llevando un gasto de 180 lps (0.473 Hm³/mes).
4. “Demanda Clandestina” representa en nuestro esquema al desvío ilegal de agua que existe a través de toda la línea de conducción que va desde el embalse hasta la planta potabilizadora.
5. La conducción “Cointzio-Planta 2” representa la continuación de la conducción que va desde el embalse a la planta, inicia en el “Nudo 15” hasta la “Planta Potabilizadora” llevando un gasto igual a la diferencia del gasto conducido por la conducción “Cointzio-Planta” y el gasto desviado a la “Demanda Clandestina” dando como resultado 420 lps (1.104 Hm³/mes).
6. El “Nudo 10” representa la “Planta Potabilizadora” el cual recibe agua del embalse Cointzio, del Manantial La Mintzita y del Manantial San Miguel.
7. La conducción “Mintzita-Planta” representa la línea de bombeo la cual transporta agua proveniente del Manantial la Mintzita a la Planta Potabilizadora y cuyo gasto es de 550 lps (1.445 Hm³/mes).
8. La conducción “Mintzita-Tanque” representa en el esquema una línea de conducción tipo 1 que representa el bombeo que transporta un gasto de 133 lps (0.349 Hm³/mes) que es proveniente del Manantial La Mintzita y con destino a un tanque de regularización de nombre Tzindurio.
9. El “Nodo 14” representa el tanque Tzindurio el cual almacena y regula el agua que es traída del Manantial La Mintzita.
10. La conducción “Tanque-Morelia” lleva el agua desde el Tanque Tzindurio al “Nudo 13”.
11. El acuífero “Salto-Higuera” representa un acuífero de tipo manantial que a su vez representa los manantiales El Salto y La Higuera, ubicados en la ciudad de Morelia en la colonia Manantiales y los cuales tienen una producción de 35 lps (0.092 Hm³/mes).
12. El bombeo “S-H” representa la extracción de agua de los manantiales hacia el “Nudo 13”.
13. El acuífero tipo manantial de nombre San Miguel tiene una producción media de 131 lps (0.344 Hm³/mes) el cual se ubica a pocos kilómetros de la ciudad en un poblado llamado San Miguel del Monte.
14. Bombeo “San Miguel” representa las extracciones de agua del Manantial San Miguel que son de 131 lps (0.344 Hm³/mes) para conducirlos al “Nudo 12” y después a través de la conducción tipo 1 denominada San Miguel-Planta transportarla a la Planta Potabilizadora.
15. Conducción Planta-Morelia corresponde a una conducción que transportará toda el agua proveniente de la Planta Potabilizadora “Nudo 10” al “Nudo 13” que es de 1101 lps (2.89 Hm³/mes).
16. El “Nudo 13” es donde llegan las aguas de todas las diferentes fuentes de abastecimiento para posteriormente alimentar a la Demanda Urbana de Morelia. La suma de toda el agua que llega a este nudo es de 1269 lps (3.334 Hm³/mes).
17. Para llevar agua del “Nudo 13” a la “Demanda Urbana de Morelia” se hará a través de la conducción tipo 1 de nombre “Morelia” que es conectada al “Nudo 18” y

después es llevada por la conducción tipo 1 nombrada “Toma Morelia” la cual contemplara las pérdidas físicas del sistema que es de 50%.

18. De igual manera se tomara agua mediante bombeo procedente del acuífero Morelia-Queréndaro a la Demanda Urbana de Morelia el cual será de 1662 lps (4.36 Hm³/mes).
19. Toda el agua que es transportada por los elementos antes mencionados tendrán como destino la “Demanda Urbana de Morelia”, en la cual se especificará la demanda incluyendo pérdidas físicas del sistema, esto es de 3257 lps (8.56 Hm³/mes).

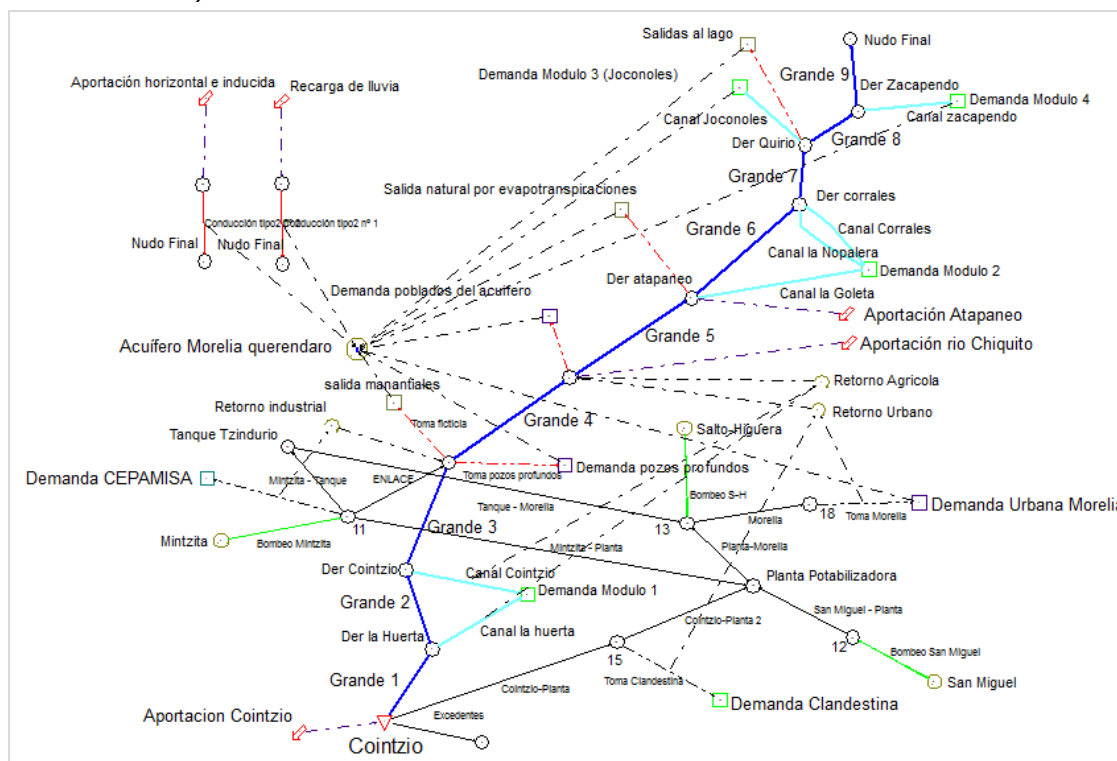


Fig. 7.4 Modificaciones del esquema de simulación actual de la demanda urbana de Morelia.

7.3 Simulación de la gestión para los escenarios de cambio climático

Se proponen escenarios de simulación para la corrección y prevención al efecto del cambio climático y mejorar el suministro del recurso hídrico para la demanda urbana. Estos escenarios son evaluados en el Modelo de simulación para los escenarios climáticos A2, A1B y B1 para poder analizar la mejora en la gestión de la demanda urbana y determinar cuál de los escenarios de simulación es el más viable para la debida corrección al problema tanto presente como futuro con cambio climático.

Para los siguientes escenarios de simulación se propone analizarlos desde el año 2010 hasta el 2100, siendo estos 90 años fraccionados en periodos de 30 años, así que los periodos se contemplaran del año 2010 al 2040, del 2040 al 2070 y 2070 al 2100.

Así como también se plantea optimizar la eficiencia del sistema hidráulico que abastece a la ciudad de Morelia, la cual actualmente es del 50% por las pérdidas físicas en el mismo, se analizara su eficiencia al 75% que sería la eficiencia más factible de se podría obtener; según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) entre el 25 y 50% de agua suministrada en países primermundistas de Europa se pierde por causas de infiltración o derrame, robo y en general por el deterioro de la infraestructura hidráulica. Asimismo evaluaremos la eficiencia al 100%.

Los escenarios que serán evaluados y simulados con apoyo del modelo SIMGES son los siguientes:

- 1 Simulación de la situación actual de la ciudad a futuro, considerando todas las fuentes de agua existentes como lo son la presa Cointzio, manantiales y pozos profundos, sin considerar el aumento de la demanda, ni el aumento de la fuente de abastecimiento actual. Con el objeto de conocer la situación a la que tiende la ciudad de Morelia actualmente, así como las garantías en el suministro y el déficit que pueda existir en la demanda urbana, propuesta que llamaremos **Escenario 1**.
- 2 Simulación de demanda urbana futura, tomando en cuenta el incremento en la demanda para los 3 periodos y escenarios climáticos antes mencionados, considerando además la eficiencia con la que es abastecida esta demanda, para ello valoraremos la eficiencia del sistema de abastecimiento al 50%, 75% y 100%. Escenarios que denominaremos **Escenarios 2A, 2B y 2C** respectivamente, sin considerar el aumento del recurso hídrico.
- 3 Se simula la situación futura del sistema con el 50% de eficiencia que es la que actualmente se presenta en la ciudad y para la cual planteamos alternativas para aumentar la oferta del recurso hídrico como, proponer un embalse aguas arriba del río Chiquito de Morelia (**Escenario 3A**), aprovechar los excedentes de la presa Cointzio a través de una conducción nueva (**Escenario 3B**), y la propuesta de aprovechar los beneficios de estos 2 escenarios simultáneamente (**Escenario 3C**).
- 4 Para esta simulación, de igual manera se plantea mejorar la oferta tomando en cuenta el incremento de la demanda urbana pero con una eficiencia en el sistema de 75%, y se proponen las mismas mejoras de los escenarios 3A, 3B y 3C, creando así los nuevos escenarios de simulación para esta eficiencia propuesta, estos los identificaremos por el embalse rio Chiquito (**Escenario 4A**), uso de excedentes de Cointzio (**Escenario 4B**) y la simulación conjunta (**Escenario 4C**).

7.3.1 Esquema de simulación de los escenarios propuestos.

Simulación de la situación actual de la ciudad sin aumento de la fuente (**Escenario 1**)

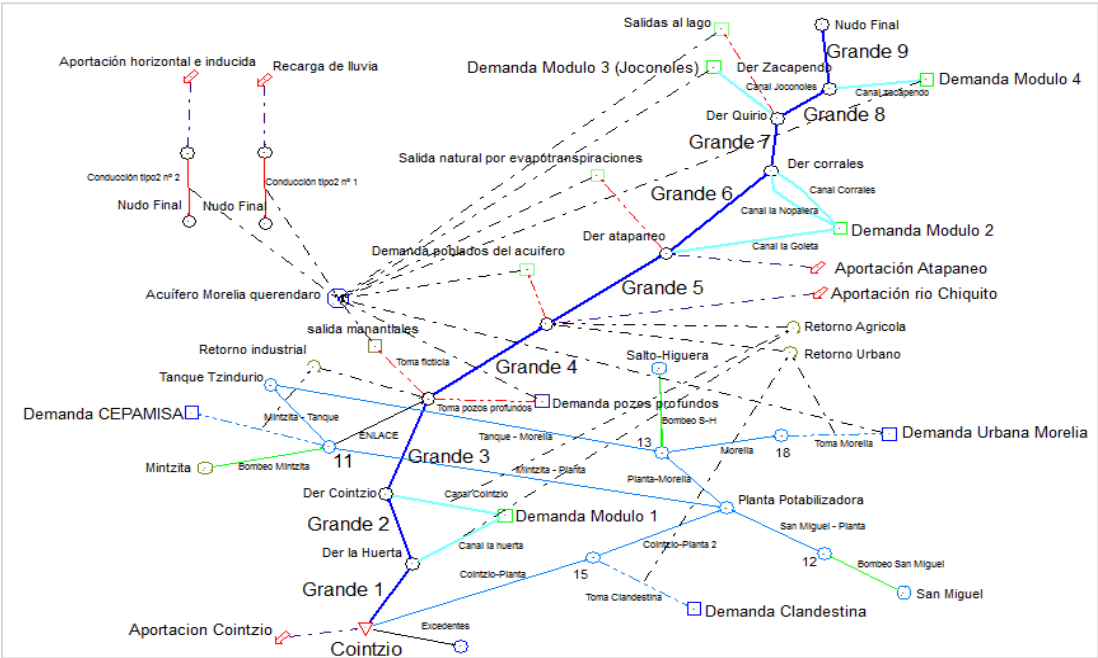


Fig. 7.5 Esquema de simulación Escenario 1 (Escenario actual).

En este escenario se consideran todas las fuentes de abastecimiento de agua como son la presa de Cointzio, los manantiales: Mintzita, Salto-Higuera y San Miguel y pozos profundos tomando en cuenta la demanda clandestina. El escenario presenta una demanda actual (considerando pérdidas) de 3257 lps (8.56 Hm³/mes).

Se considera que el 50% de agua suministrada para la demanda urbana se desperdicia debido a las prdidas físicas en la red de distribución y las cuales llegan a recargar el acuífero Morelia-Queréndaro. La otra parte del suministro que realmente llega para la demanda urbana se considera que el 85% es agua que retorna al sistema por el drenaje de la ciudad y el restante 15% es consumido por la población. Entonces el coeficiente de retorno será de 0.425 y el coeficiente de consumo será de orden del 0.075, ambos coeficientes suman 0.50 que representa el 50% del agua realmente suministrada.

Tabla 7.2 Cálculo de los coeficientes de retorno y consumo requeridos por el modelo.

	Lps	Porcentaje	Coeficiente
Suministro total de agua para la demanda urbana	3257.00	100.00%	1.000
Suministro que se pierde en el sistema	1628.50	50.00%	0.500
Suministro abastecido	1628.50	50.00%	0.500
Agua que retorna al sistema (85%)	1384.23	42.50%	0.425
Agua consumida por la población (15%)	244.28	7.50%	0.075

Escenario de Simulación	Eficiencia	Demanda Actual	Demanda Urbana Futura			
			2010-2040	2040-2070	2070-2100	
2A	50%	3257	4262	5577	7295	Lps
		8.56	11.2	14.65	19.17	Hm ³ /mes
2B	75%	2173	2843	3718	4863	Lps
		5.71	7.47	9.77	12.78	Hm ³ /mes
2C	100%	1628	2131	2788	3648	Lps
		4.28	5.6	7.33	9.59	Hm ³ /mes

Para este escenario se toma como base el Escenario 1 que considera todas las fuentes de abastecimiento de agua como son la presa de Cointzio, los manantiales: Mintzita, Salto-Higuera y San Miguel y pozos profundos. También empleamos las demandas urbanas futuras que consideramos en el escenario 2A correspondiente a la eficiencia actual del 50%. Para mejorar la oferta en el sistema se propone un embalse aguas arriba del río Chiquito de Morelia que prevé optimizar el suministro a esta ciudad.

En las modificaciones del esquema se incluyen los siguientes nuevos elementos:

- Se incluye un nuevo embalse de nombre “Embalse Propuesto” para almacenar las aportaciones del río Chiquito, su ubicación es al sureste a pocos kilómetros de la ciudad. Para introducir el embalse en nuestro esquema requerimos parámetros físicos del mismo como son:
 - Volumen máximo que es la capacidad máxima de agua que puede almacenar (10.70 Hm³),
 - Volumen objetivo es la capacidad de agua con que se desee que esté operando el embalse es un volumen entre el volumen máximo y el volumen medio (5 Hm³) y el
 - Volumen mínimo que es un volumen para azolves (1 Hm³). También se debe introducir en la ficha del embalse los datos de las curvas cota-superficie –volumen (ver Anexo 1) así como valores de evaporación similares al de Cointzio.
 - Volumen inicial de 3 Hm³ y un caudal máximo de sueltas de 0.9 Hm³/mes.
- La aportación del río Chiquito la cual se unía al nudo 5, pasa a conectarse directamente al Embalse Propuesto y se introduce una nueva conducción con el nombre de “Chiquito” que nos representa el río Chiquito el cual va desde el embalse hasta unirse con el río Grande en el Nudo 5.
- Se introduce una conducción adicional tipo 1 denominada “Nuevo-Planta” que parte del Embalse Propuesto para incorporarse al nudo 12 con una capacidad de 343 lps (0.90 Hm³/mes).
- Otra consideración que se hizo en este escenario es dejar de suministrar a la demanda Clandestina, para que los 600 lps que vienen de la presa Cointzio a la planta potabilizadora sea aprovechada en su totalidad por la ciudad y así aumentar más la oferta a la demanda urbana.
- La demanda se considera la actual de 3257 lps (8.56 Hm³/mes) referente de la eficiencia del sistema del 50%.

Esquema de simulación futura con incremento en la oferta y la demanda con eficiencia del 50%, mediante uso de excedentes de la presa Cointzio (**Escenario 3B**)

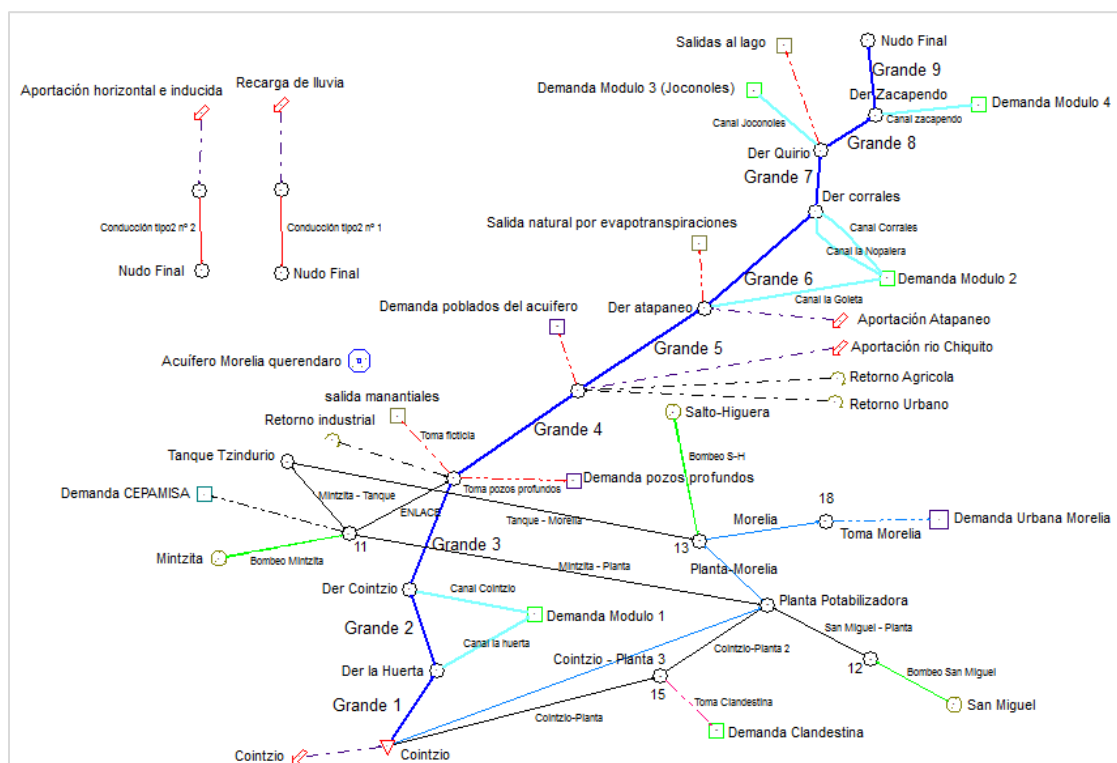


Fig. 7.8 Esquema de simulación Escenario 3B.

- En este escenario, se utiliza como base el Escenario 1, que considera todas las fuentes existentes y se propone para este escenario utilizar los excedentes de la presa de Cointzio, así como el aumento en la demanda propuesto en el escenario 2A que considera la eficiencia del sistema de 50%.
- El agua proveniente de los excedentes será llevada por medio de una línea de conducción paralela a la existente la cual va desde la presa hasta la planta potabilizadora y cuyo nombre asignado es Cointzio-Planta 3 y el cual llevará un gasto de 380 lps (1 Hm³/mes). La demanda clandestina dejara de ser abastecida con agua de Cointzio y la demanda se considera según el periodo de simulación a analizar.



- En este escenario se consideran todas las fuentes existentes en el escenario 1 y se propone unir los elementos de nuevo ingreso implementados en los escenarios 3A y 3B, así que tenemos en el mismo esquema de simulación el embalse del río Chiquito y el uso de los excedentes del embalse Cointzio para analizarlos conjuntamente. Aunado al aumento de la demanda que presenta el escenario 2A que plantea la eficiencia actual del 50% en el sistema.

Esquemas de simulación futura con aumento de la oferta y la demanda con eficiencia del 75%, para los **Escenarios 4A, 4B y 4C**.

Para el **escenario 4A**, tomamos como base las mismas características y cambios impuestos en el escenario 3A, en el que consideramos la creación de un nuevo embalse aguas arriba del río Chiquito, pero en este caso tomando en cuenta una eficiencia del sistema del 75% y las demandas correspondientes a los periodos futuros de simulación (ver Tabla 7.3).

De igual manera con el **escenario 4B**, partimos de los elementos y ajustes empleados en el escenario 3B, con la variable de la eficiencia, la cual incrementamos al 75% y donde

planteamos usar los excedentes de la presa de Cointzio para mejorar el suministro futuro de la demanda urbana para los periodos pertinentes en la Tabla 7.3.

En el **escenario 4C**, suponemos las demandas calculadas para una eficiencia del 75% ver Tabla 7.3, empleando como base el esquema de simulación planteado para el escenario 3C, donde colocamos simultáneamente la presa en el rio Chiquito y la conducción nueva que transporta los excedentes de la presa Cointzio, ambos elementos propuestos para el aumento del recurso hídrico.

Nota. No se proponen escenarios con el 100% de eficiencia en el sistema de abastecimiento, esta eficiencia sería la óptima en cualquier país. Pero en los países primermundistas donde ya tienen más control sobre estos temas de conservación y manejo del agua dulce, presentan deficiencias en sus redes de abastecimiento de este recurso, donde llegan a perder aproximadamente el 50% del agua transportada por deterioro de sus conducciones. Es por ello que llegar o proponer mejorar al 100% es muy complicado y más aún en países en desarrollo como el nuestro.

8 Resultados en la demanda urbana para los diferentes escenarios climáticos.

El principal elemento a evaluar fue el suministro de agua en la cuenca del río Grande de Morelia, enfatizando en la ciudad de Morelia, la que fue evaluada en cuestión de los índices de garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas e industriales establecidas en el sistema, para conocer las repercusiones futuras que pretenden la disminución del recurso hídrico para satisfacerlas de manera óptima.

Los resultados que hemos obtenido en base a las corridas para los diferentes escenarios de simulación propuestos en el capítulo anterior, fueron hechas con el Sistema de Apoyo a la Decisión AquaTool/SIMGES, el cual nos auxilia en la simulación de la gestión de cuencas complejas, nos han permitido evaluar los probables efectos del cambio climático en el recurso hídrico que abastece la demanda urbana de la ciudad de Morelia, estas evaluaciones corresponden principalmente a las variaciones futuras en las demandas urbanas, agrícolas e industriales, que darán paso a proponer las medidas de mitigación más adecuadas para conservar y manejar de manera óptima este recurso hídrico.

Cabe mencionar que los gastos empleados e introducidos en el modelo de simulación, fueron determinados previamente por dos compañeros del cuerpo del Gestión Integral del Agua (GIA) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

Los gastos analizados por el modelo UKMO_HAD1 fueron determinados para el proyecto de tesis de la Ing. Denise Lisette García Pérez titulado “Metodología para la obtención de gastos con efectos del cambio climático para la cuenca del río Grande de Morelia”, y para el modelo ENSAMBLE el proyecto de tesis realizada por el Ing. Joel Hernández Bedolla “Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos” ambos proyectos dirigidos por la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, UMSNH.

Los resultados que se presentaran a continuación son mostrados en gráficos de columna para cada uno de los modelos de circulación general propuestos, para ello los analizaremos por criterios de garantías, periodos de años simulados y escenarios de simulación descritos en el capítulo 7, así como también de los escenarios climáticos A1, A1B y B1.

8.1 Análisis de resultados de la demanda urbana con diferentes criterios de garantías.

El grupo de "Garantías" permite definir los criterios para la identificación de fallos por cada uno de los criterios de garantía mostrados a continuación, los cuales son con los que toma en consideración AquaTool/SIMGES:

Tipo mensual

- Fallo en un mes si el déficit es mayor que un 11% de demanda mensual (ecuación 1)

$$G = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de meses totales}}\right) * 100 \quad (1)$$

Tipo anual

- Fallo en un año si en un mes el déficit es mayor que un 15% de demanda mensual o en el año es mayor que 30% de la demanda anual (ecuación 2)

$$G = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de años totales}}\right) * 100 \quad (2)$$

Garantía basada en frecuencia de fallo no permite evaluar:

- Posible magnitud catastrófica del fallo
- Concentración de fallos en un periodo

Criterios basados en déficit:

- Máximo déficit mensual
- Máximo déficit en n meses consecutivos

Criterio Planes Hidrológicos 81

- Demanda Urbana
 - Fallo mensual si suministro < 0.8% demanda
 - Cumple si garantía > 96%
- Demanda industrial /agrícola /otras
 - Fallo anual si
- en algún mes suministro < 0.75 demanda
- En 3 meses consecutivos suministro < 0.8 demanda en cada uno

Criterio UTAH-DWR

- Criterios
 - a 1año: fallo < 10% demanda anual
 - a 2 años: fallo < 16% demanda anual
 - a 10 años: fallo < 30% demanda anual
- Cumple si no se da fallo en ningún criterio.
(Muy usado en Planes Hidrológicos en España)

Criterio IPH 2008

A efectos de la asignación y reserva de recursos se considerará satisfecha la demanda urbana cuando:

- El déficit en un mes no sea superior al 8% de la correspondiente demanda mensual.
- En diez años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 10% de la demanda anual.

En las Fig. 8.1 y Fig. 8.2 los valores adoptados e introducidos para la demanda urbana de Morelia y para los módulos de riego de la cuenca del rio Grande en nuestros escenarios de simulación desarrollados en SIMGES. Estos valores nos darán los resultados en base a los criterios antes mencionados, estos criterios son usados principalmente en la gestión de cuencas de España. Así que estos datos propuestos para nuestra cuenca son introducidos en base a experimentación española, tratando de ajustarla lo mejor posible a nuestra zona de estudio.

Garantía mensual		Garantía Anual	
Fallo mensual (% D.M.)	11	Fallo mensual (% D.M.)	15
		Fallo anual (% D.A.)	30
Criterio tipo UTAH DWR			
Fallo anual (% D.A.)	10	Fallo 2 años (% D.A.)	16
Fallo 10 años (% D.A.)	30		
Criterio IPH,2008 demandas urbanas			
Máximo fallo mensual %	8	Máximo fallo a 10 años %	10

Fig. 8.1 Garantías para la demanda urbana de Morelia.

Garantía mensual		Garantía Anual	
Fallo mensual (% D.M.)	10	Fallo mensual (% D.M.)	15
		Fallo anual (% D.A.)	30
Criterio tipo UTAH DWR			
Fallo anual (% D.A.)	25	Fallo 2 años (% D.A.)	40
Fallo 10 años (% D.A.)	80		
Criterio IPH,2008 demandas urbanas			
Máximo fallo mensual %	8	Máximo fallo a 10 años %	10

Fig. 8.2 Garantías para las demandas agrícolas de la cuenca del rio Grande de Morelia.

8.1.1 Análisis de resultados evaluados por el criterio de garantía volumétrica.

Haciendo las corridas pertinentes del programa simges obtuvimos para cada modelo, escenario de simulación, escenario climático los siguientes resultados, y así poder analizarlos para las garantías indicadas.

Tabla 8.1 Resultados del escenario climático A2 por criterio de garantías volumétricas para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1.

Garantías Escenario de Simulación	ENSAMBLE						UKMO_HAD1					
	Escenario climático A2						Escenario climático A2					
	2010-2040		2040-2070		2070-2100		2010-2040		2040-2070		2070-2100	
	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)
Actual	100.0%	100.0%	-	-	-	-	100.0%	100.0%	-	-	-	-
1A	96.9%	89.6%	91.9%	89.0%	83.1%	88.0%	90.6%	88.8%	89.4%	88.7%	83.1%	88.0%
2A	0.0%	68.3%	0.0%	51.7%	0.0%	39.1%	0.0%	67.4%	0.0%	51.7%	0.0%	38.9%
2B	95.8%	99.4%	0.0%	81.8%	0.0%	61.7%	90.0%	98.6%	0.0%	81.6%	0.0%	61.3%
2C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	78.1%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	81.7%
3A	0.0%	79.6%	0.0%	59.7%	0.0%	44.9%	0.0%	78.3%	0.0%	59.9%	0.0%	44.7%
3B	0.0%	79.7%	0.0%	59.4%	0.0%	44.0%	0.0%	76.7%	0.0%	59.2%	0.0%	43.9%
3C	82.2%	87.1%	0.0%	64.6%	0.0%	47.7%	71.4%	84.0%	0.0%	64.8%	0.0%	47.7%
4A	97.5%	99.7%	75.8%	89.5%	0.0%	67.3%	94.2%	99.2%	81.9%	89.7%	0.0%	67.0%
4B	92.8%	99.1%	78.6%	89.0%	0.0%	66.0%	85.0%	97.9%	78.6%	88.8%	0.0%	65.9%
4C	96.7%	99.6%	81.4%	94.6%	0.0%	71.6%	93.3%	99.0%	81.4%	94.7%	0.0%	71.6%

En la Tabla 8.1 se muestran los resultados referentes al criterio de garantía volumétrica que para mejor comprensión, estos números restantes son expuestos con gráficos de barras como se aprecia en las siguientes tres imágenes.

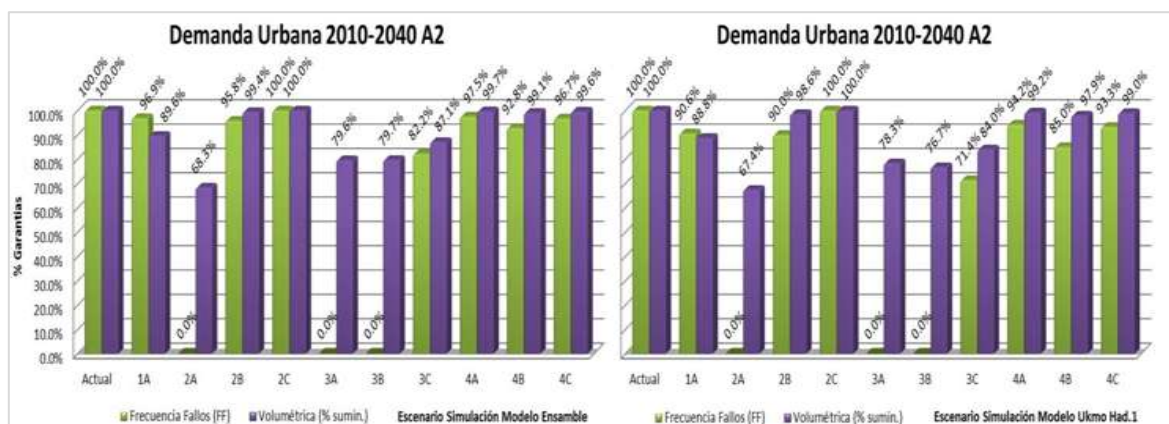


Fig. 8.3 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A2 del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2010-2040.

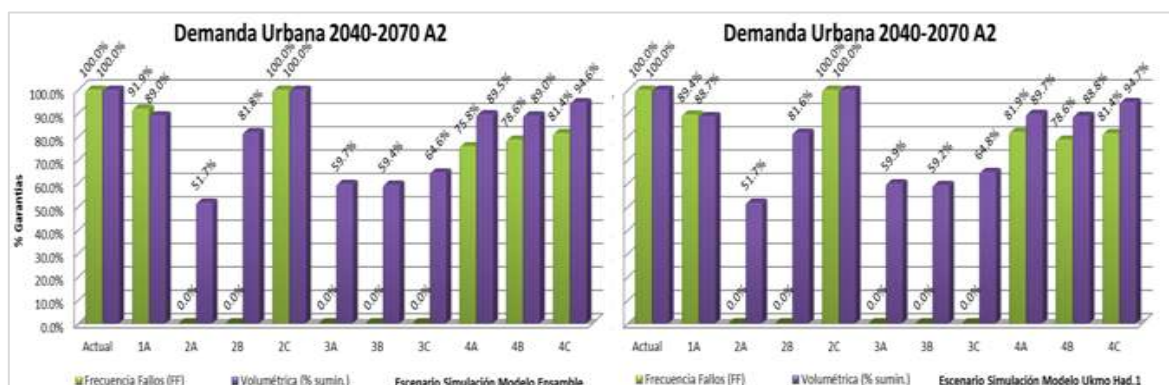


Fig. 8.4 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A2 del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2040-2070.

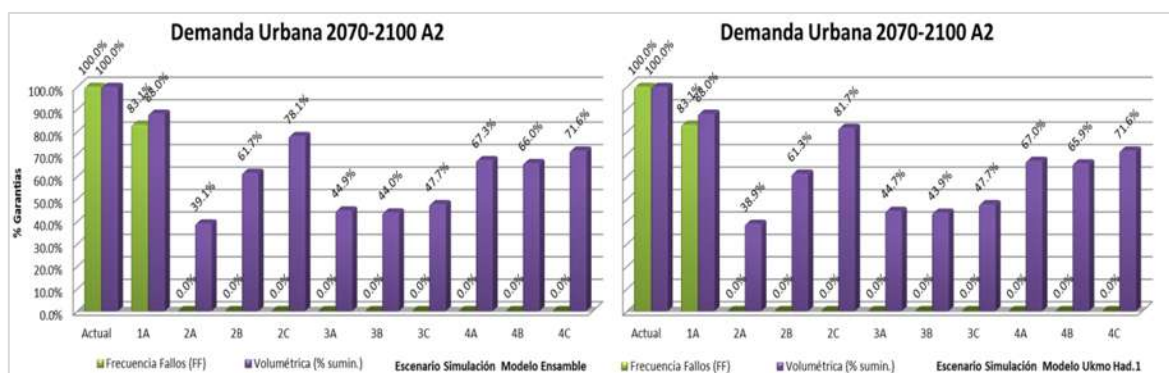


Fig. 8.5 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A2 del modelo Ensemble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2070-2100.

En estos resultados del escenario climático A2, que de los tres escenarios analizados este es el más desfavorable, observamos de manera general que la garantía del recurso hídrico va decreciendo conforme transcurre el tiempo. En las gráficas del modelo Ensemble ligeramente nos garantiza un poco más de suministro que el modelo Ukmo_Had1, esto por los criterios que toman cada criterio al ser desarrollado estos modelos, como se había comentado, el primero es un Ensemble de 10 modelos y el segundo es uno de esos modelos, el cual tenía más correlación con los valores históricos en la cuenca del río Grande de Morelia.

Para ello nos colocamos en el escenario de simulación 2A, 2B y 2C de ambos modelos de circulación general, que nos plantea solo el aumento de la demanda urbana a futuro para las tres eficiencias propuestas del sistema de abastecimiento, y que nos arroja para el escenario al que tiende nuestra ciudad es el 2A con una eficiencia del 50% en que la garantía volumétrica va disminuyendo del 100% actual al 68.3%, 51.7% y 39.1% respectivamente a los periodos simulados con el modelo Ensemble y con el Ukmo_Had1 al 67.4%, 51.7% y 38.9%.

Pero si en un futuro a mediano plazo la eficiencia del sistema fuera incrementada a un 75% como lo planteamos en el escenario 2B, nos garantizaría el aumento volumétrico de agua dulce de manera casi inmediata para muestra, Ensemble presenta 99.4%, 81.8% y 61.7% y Ukmo 98.6%, 81.6% y 61.3%.

Sin embargo, el abastecimiento para el 2070 y 2100 todavía no estaría garantizado así que se hizo la simulación para el 100% de eficiencia marcada en el escenario 2C, para observar el comportamiento que podría tener el sistema si no tuviera perdida alguna en su suministro, caso que es prácticamente imposible para una metrópoli en expansión como la nuestra. Así que si tuviéramos este escenario, nuestra garantía volumétrica sería satisfactoria en su totalidad hasta el año 2070 y para el año 2100 esta garantía podría ser manejable para satisfacer a gran parte de nuestra demanda futura.

Al tener actualmente una eficiencia de 50% en el sistema de suministro y viendo las deficiencias en el abastecimiento futuro a la demanda urbana, se deben proponer mejoras

en el sistema lo más pronto posible, así que en los escenarios 3A, 3B y 3C se proponen mejoras para la eficiencia actual.

Al sugerir realizar en el escenario 3A una presa aguas arriba del río Chiquito de Morelia se pueden ver mejoras en la garantía del agua con Ensamble de 79.6%, 59.7% y 44.9% y con Ukmo de 78.3%, 59.9% y 44.7% respectivamente a los periodos simulados. Otra propuesta es el emplear los excedentes de la presa Cointzio del escenario 3B que prácticamente nos garantiza el mismo volumen que el uso de la presa Chiquito, dando valores de 79.7, 59.4 y 44 por ciento con Ensamble y con Ukmo de 76.7, 59.2 y 43.9 por ciento. Sin embargo observamos que sigue siendo insuficiente el recurso hídrico para años próximos y futuros, por lo tanto se insinúa combinar ambos proyectos de mejora en un nuevo escenario 3C, del que derivamos las siguientes garantías, 87%, 64.5% y 47.7% para Ensamble y 84%, 64.8% y 47.7% para Ukmo que a grandes rasgos no mejora lo que se esperaba, puesto que la demanda urbana es la de mayor prioridad para suministrar en un sistema de abastecimiento de agua.

Así que viendo que el escenario climático A2 es el que presenta condiciones más críticas y este escenario le aunamos la deplorable eficiencia del sistema hidráulico del 50%, queda analizar los mismos tres elementos de mejora propuestos para los escenarios 3, pero en esta ocasión considerando incrementar la eficiencia hidráulica al 75%, puesto que en el escenario 2B observamos una mejora en el suministro urbano proyectando solo más eficiencia en el sistema sin considerar fuentes alternas de distribución, ahora veremos si existe alguna mejora adicional para hacer llegar más agua a la ciudad de Morelia para años venideros.

Observando las gráficas anteriores para esta eficiencia del 75% y los nuevos elementos propuestos en los escenarios 4A, 4B y 4C, tenemos las siguientes garantías volumétricas, para el escenario 4A que de igual manera plantea el embalse del río Chiquito se observa mejora, teniendo con Ensamble 99.7%, 89.5% y 67.3% y con Ukmo 99.2%, 89.7% y 67%, es este escenario comparado con el 3A se nota que se amplía el suministro, checando para el año 2100 que en el escenario 3A muestra 44% y con el 4A garantiza el 67% dando mejores resultados el escenario con eficiencia del 75%.

Así mismo los escenarios 4B que emplea los excedentes de Cointzio y el 4C que combina ambos elementos para aumentar el suministro, muestran bastantes mejorías respecto a los escenarios 3. Siendo estos resultados de gran ayuda para conocer el comportamiento que podría presentarse en toda el área de la cuenca del río Grande enfatizando en la demanda urbana de la ciudad de Morelia.

Tabla 8.2 Resultados del escenario climático A1B por criterio de garantías volumétricas para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1.

Garantías Escenario de Simulación	ENSAMBLE						UKMO_HAD1					
	Escenario climático A1B						Escenario climático A1B					
	2010-2040		2040-2070		2070-2100		2010-2040		2040-2070		2070-2100	
	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)
Actual	100.0%	100.0%	-	-	-	-	100.0%	100.0%	-	-	-	-
1A	99.7%	90.0%	96.9%	89.6%	97.8%	89.7%	98.1%	89.7%	95.0%	89.4%	86.9%	88.4%
2A	0.0%	68.7%	0.0%	52.3%	0.0%	39.9%	0.0%	68.3%	0.0%	52.0%	0.0%	39.3%
2B	98.6%	99.8%	0.0%	83.1%	0.0%	63.4%	95.6%	99.5%	0.0%	82.5%	0.0%	62.0%
2C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	84.5%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	82.6%
3A	0.0%	80.6%	0.0%	61.4%	0.0%	46.8%	0.0%	80.2%	0.0%	61.0%	0.0%	45.5%
3B	0.0%	81.0%	0.0%	61.3%	0.0%	46.5%	0.0%	79.8%	0.0%	60.0%	0.0%	44.9%
3C	91.7%	88.8%	0.0%	67.2%	0.0%	51.0%	86.9%	87.6%	0.0%	66.0%	0.0%	49.1%
4A	99.4%	99.9%	93.3%	92.1%	0.0%	70.1%	98.9%	99.8%	90.0%	91.4%	0.0%	68.3%
4B	96.9%	99.6%	91.4%	91.8%	0.0%	69.7%	92.2%	99.0%	82.5%	90.0%	0.0%	67.3%
4C	99.4%	99.9%	91.9%	98.1%	0.0%	76.5%	98.9%	99.8%	84.7%	96.4%	0.0%	73.6%

La Tabla 8.2 representa los resultados de las simulaciones para el escenario climático A1B el cual plantea la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes de energía, tanto fósiles y no fósiles. Y de los cuales obtenemos las siguientes graficas que hacen más sencilla la comprensión de dichos resultados.

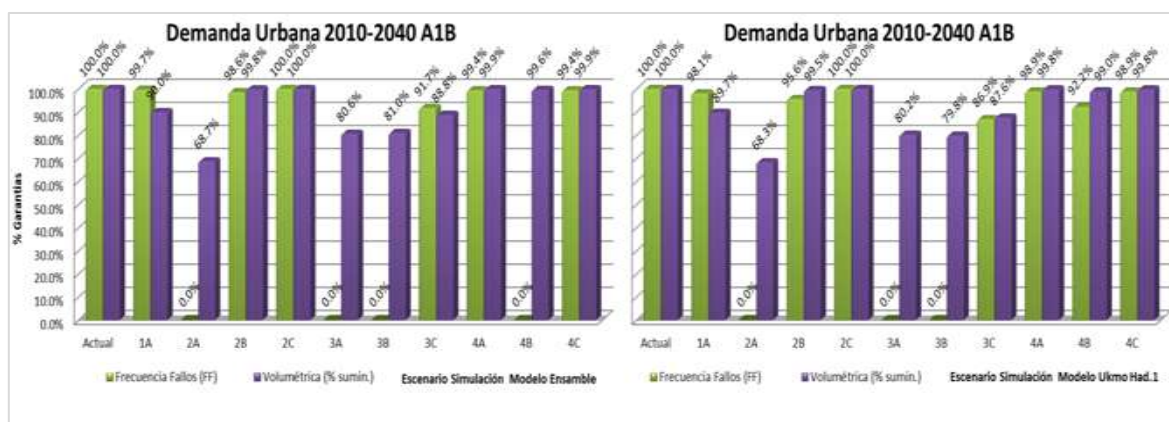


Fig. 8.6 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A1B del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2010-2040.

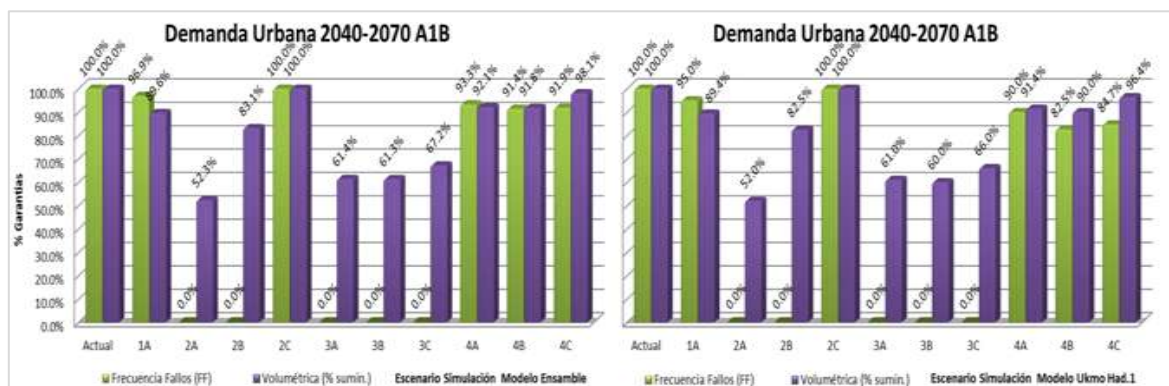


Fig. 8.7 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A1B del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2040-2070.

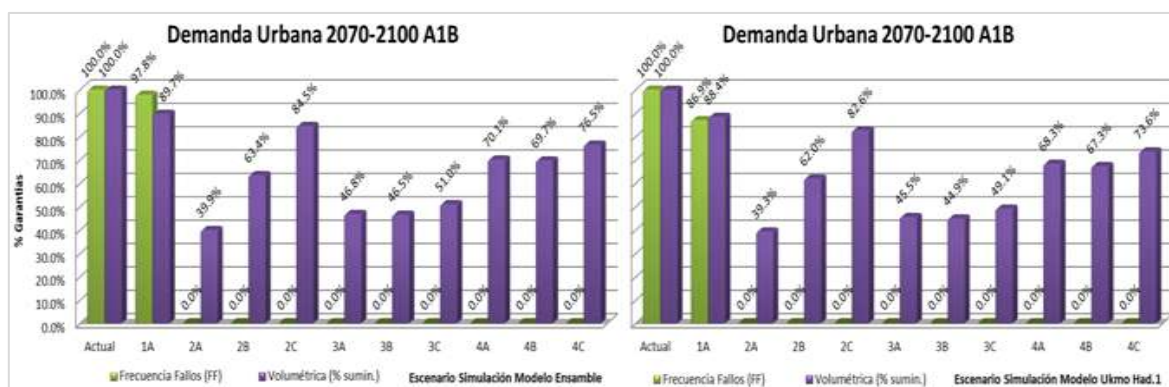


Fig. 8.8 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático A1B del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2070-2100.

Para este escenario climático se analizaron los mismos escenarios que en el A2, solo a diferencia de que este escenario se comporta mas amigable con el clima, como lo podemos apenas persivir en los resultados. Partimos de la situación actual en la cual, al momento el suministro de la demanda urbana es aceptable. Enseguida vemos el escenario 1A que solo es la representación del sistema y demanda actual, sin cambio en la fuente y en la demanda urbana de la misma, la cual nos ayuda a conocer como varia el suministro para las demandas a travez del tiempo a modo de validación.

Con los escenarios 2A, 2B Y 2C, planteamos el comportamiento futuro de la cuenca y de la ciudad de Morelia incrementando solamente la demanda urbana para los tres periodos definidos que fueron desarrollados en base a la eficiencia del sistema hidraulico, dichas eficiencias son 50%, 75% y 100% respectivamente.

Las garantías volumétricas obtenidas con el escenario 2A con eficiencia del 50% resultaron, para Ensamble 68.7%, 52.3% y 39.9 para sus tres periodos de simulación, y para Ukmo-Had1 68.3%, 52% y 39.9%, al observar estos resultados vemos que entre los modelos existe una mínima diferencia entre sus resultados. Los volúmenes obtenidos por las corridas del escenarios 2B que maneja una eficiencia del 75% nos arroja resultados como 99.8%, 83.1% y 63.4% para Ensamble y para Ukmo de 99.5%, 82.5% y 62%.

Pero el escenario que contempla el 100% de eficiencia hablamos del 2C nos muestra que si este escenario estuviera presente con cero fallas en el sistema se estaria comportando de manera optima y el suministro de agua a futuro estaria mas que garantizada, para ello los resultados alcanzados son 100%, 100% y 84.5% con Ensamble y 100%, 100% y 82.6% con Ukmo, pero como en parrafos anteriores esta eficiencia seria casi imposible de alcanzar para nuestro caso, ya que el llegar a esta eficiencia depende de muchos factores, como economicos, sociales y administrativos.

Ya checando la carencia existente, puesto que del sistema actual aprovechamos solo el 50% de su capacidad optamos por plantear escenarios con esta eficiencia para proponer nuevos escenarios que aumenten la fuente de abastecimiento para mejorar el sistema y satisfacer lo mejor posible la demanda urbana de la ciudad de Morelia. Estos escenarios son los observados en las graficas 3A, 3B y 3C.

Con el escenario 3A tratamos de mejorar el suministro con la implementacion de una presa aguas arriba del rio Chiquito y con el escenario 3B intentamos con uso de excedentes pero al simular obtuvimos resultados que no fueron de lo mejor para el sistema, puesto que este es deficiente que aunque enviemos mas agua no va a ser suficiente y los valores de las corridas mejoran poco, por ejemplo con el modelo ensamble, que no varia en demasia del Ukmo, tenemos que estan en el orden de 81%, 61% y 46% para ambos escenarios de simulacion, pero con el escenario 3C en la que unimos los dos escenarios sube la garantia volumetrica a 89%, 67% y 51%, incrementando solo 5% que en realidad no brindan gran diferencia.

Asi que si aumentamos la eficiencia al 75% y planteamos los mismos escenarios de mejora, es mas que obvio que incrementariamos y administrariamos mas recurso hidrico, ya que no habria demasiadas perdidas en el sistema hidraulico de abastecimineto, para muestra bastaria observar los resultados de estos escenarios con una eficiencia media en paises primermundistas, dichos resultados con el modelo Ensamble y contemplando un nuevo embalse del escenario 4A son 99.9%, 92.1% y 70.1%, pero considerando la nueva presa y el uso de exedentes en el mismo escenario 4C tenemos 99.9%, 98.1%y 76.5%. estas cifras son mas razonables que las que se consideraron con la simulacion del escenario climatico A2.

Tabla 8.3 Resultados del escenario climático B1 por criterio de garantías volumétricas para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1.

Garantías Escenario de Simulación	ENSAMBLE						UKMO_HAD1					
	Escenario climático B1						Escenario climático B1					
	2010-2040		2040-2070		2070-2100		2010-2040		2040-2070		2070-2100	
	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)	Frecuencia Fallos (FF)	Volumétrica (% sumin.)
Actual	100.0%	100.0%	-	-	-	-	100.0%	100.0%	-	-	-	-
1A	99.2%	89.9%	98.3%	89.8%	100.0%	100.0%	91.4%	88.9%	91.9%	89.0%	85.3%	88.2%
2A	0.0%	68.5%	0.0%	52.3%	0.0%	40.0%	0.0%	67.7%	0.0%	51.8%	0.0%	39.2%
2B	97.5%	99.7%	0.0%	83.0%	0.0%	63.6%	91.4%	98.8%	0.0%	81.9%	0.0%	61.8%
2C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	84.8%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	82.4%
3A	0.0%	80.3%	0.0%	61.0%	0.0%	47.0%	0.0%	79.4%	0.0%	60.8%	0.0%	45.9%
3B	0.0%	80.5%	0.0%	61.2%	0.0%	47.0%	0.0%	77.1%	0.0%	59.9%	0.0%	44.3%
3C	89.4%	88.2%	0.0%	66.9%	0.0%	51.6%	75.0%	85.1%	0.0%	65.8%	0.0%	48.9%
4A	98.9%	99.9%	87.8%	91.5%	0.0%	70.5%	100.0%	100.0%	88.1%	91.1%	0.0%	68.8%
4B	95.3%	99.4%	90.8%	91.8%	0.0%	70.5%	86.1%	98.1%	83.1%	89.8%	0.0%	66.4%
4C	98.6%	99.8%	92.2%	97.6%	0.0%	77.5%	100.0%	100.0%	82.8%	96.2%	0.0%	73.4%

Como venimos mencionando los escenarios climáticos proponen dejar de emplear combustibles fosiles para tratar de disminuir los gases de efecto invernadero, asi que los dos escenarios anteriores se podrian considerar un poco pesimistas en cuanto a la adaptacion de la vida a nuevas tecnologias de generacion de energias limpias. Es por ello que se preve que el escenario B1 sera mas optimista en cuanto a resultados y garantias volumetricas. Los resultados de las corridas en este escenario climatico se presentan en la Tabla 8.3 y esta tabla es representada graficamente como acontinuacion se muestra.

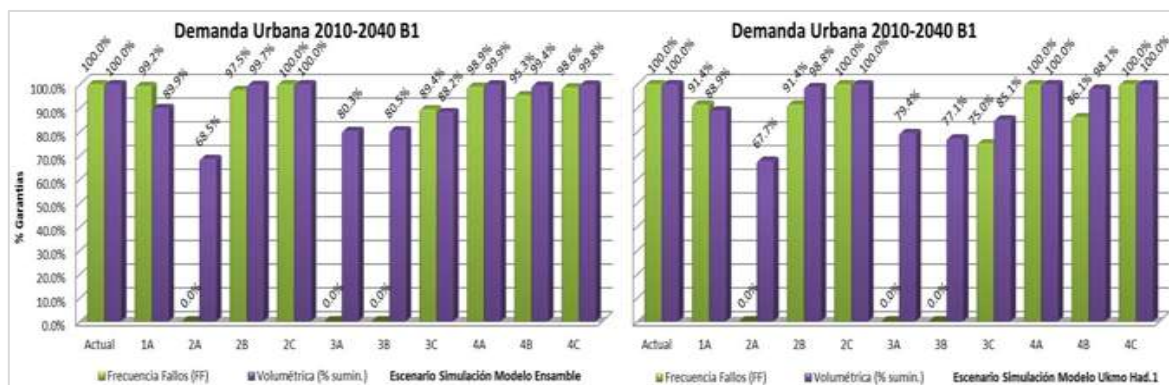


Fig. 8.9 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático B1 del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2010-2040.

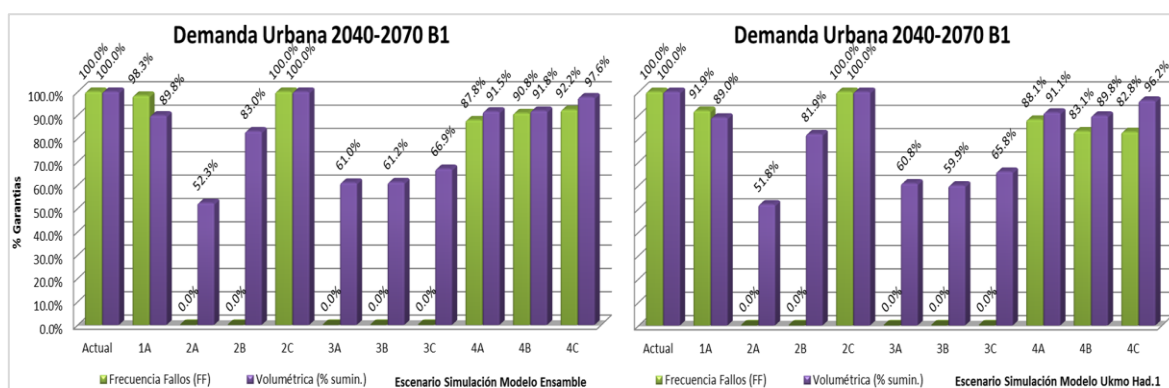


Fig. 8.10 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático B1 del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2040-2070.

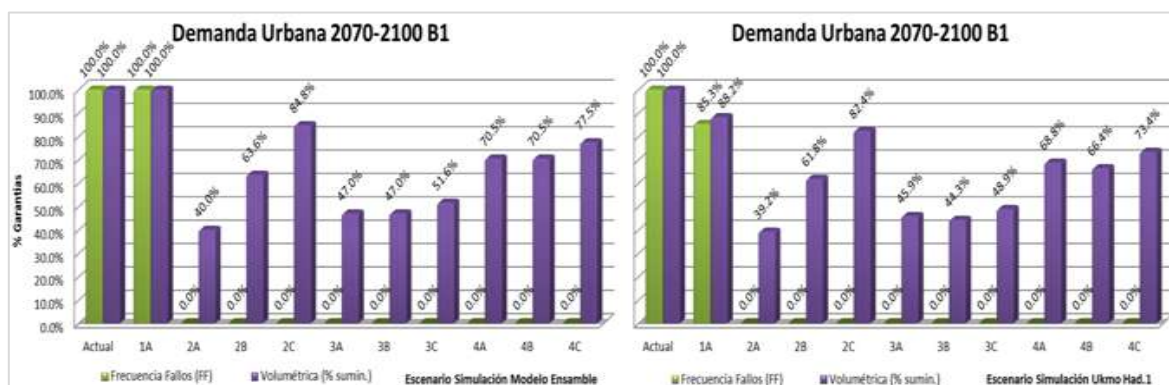


Fig. 8.11 Análisis de la demanda urbana por criterio de garantía volumétrica del escenario climático B1 del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 del periodo 2070-2100.

Analizando los resultados del escenario climático mas optimista, tenemos lo siguiente. Como ya hemos insistido, los escenarios de simulacion 2A, 2B y 2C manejan solo el aumento de la demanda al paso del tiempo, este es dividido en 3 periodos, cada uno de 30 años. Asi que de estos tres escenarios de simulacion sabemos que el primero es con una eficiencia del 50%, el segundo con una de 75% y el tercero con la del 100%.

Los resultados para la primer eficiencia que es el escenario 2A tiene con el modelo Ensemble 68.5%, 52.3% y 40% y con Ukmo 67.7%, 51.8% y 39.2% son bastante similares a los resultados de escenarios climáticos antes descritos.

Para el escenario 2B muestra que Ensemble 99.7%, 83% y 63.6% y Ukmo 99.5%, 82.5% y 62%, resultados considerando la eficiencia al 75%. Estos continúan siendo similares a los otros escenarios climáticos. Pero con el escenario 2C que maneja la eficiencia al 100% los resultados son muy parecidos al escenario climático A1B en los tres periodos simulados, pero con el escenario climático A2, este difiere un poco en el 2100 respecto a los 84.8% del B1 del modelo Ensemble.

Simulando las mejoras del sistema con el embalse del río Chiquito y uso de los excedentes presentados con los escenarios 3A, 3B y 3C para una eficiencia del 50% y los escenarios 4A, 4B y 4C para 75% de eficiencia en el sistema hidráulico.

De estos dos bloques de escenarios podemos decir que para los referentes al 50%, que es lo que actualmente presenta nuestro sistema, los resultados de los escenarios 3A y 3B son prácticamente iguales para ambos modelos de circulación, esto indica que el implementar la presa Chiquito da la misma garantía volumétrica que el usar los excedentes de la presa Cointzio. Pero al unir ambos beneficios en el escenario 3C la garantía incrementa solo un poco, con Ensemble tenemos 88.2%, 66.9% y 51.6% y con Ukmo 85.1%, 65.8% y 48.9% correspondientes a los periodos de simulación, estos valores tienen similitud con los del escenario climático A1B.

Considerando la eficiencia del 75% podemos decir que el sistema se comporta mejor con los valores del modelo Ensemble, por ejemplo en el escenario de simulación 4A y 4B los valores obtenidos del uso de embalse Chiquito y del uso de excedentes de presa Cointzio son bastante similares entre ellos. Con los valores del modelo Ukmo pasa lo mismo entre estos dos escenarios pero brindando un poco menos de garantía de lo que ofrece el modelo Ensemble. Para el escenario 4C Ensemble ofrece 99.8%, 97.6% y 77.5%, en cuanto Ukmo ofrece 100%, 96.2% y 73.4%. Estos resultados nos indican que para el 2040 y 2070 tenemos el recurso hídrico garantizado con pocos fallos al abastecerlo, pero al 2100 la garantía decrece poco más del 20% y por consecuencia la frecuencia de fallos en el abastecimiento aumentan por el poco recurso existente, ya que será primordial contener y administrar este recurso por la poca disponibilidad que habrá en el futuro, si es que continuamos con el mismo ritmo de crecimiento y usos del recurso.

8.1.2 Análisis de resultados evaluados por el criterio de planes hidrológicos.

Este criterio de planes hidrológicos al igual que los demás criterios es de origen español, en este criterio se considera el porcentaje de fallos mensuales habidos en el suministro y en base a estos fallos saber si el recurso está garantizado para los periodos analizados, este método tiene sus indicadores, que al no abastecer mensualmente como mínimo el 8% de la demanda urbana lo considera como fallo, y cumple cuando la garantía mensual es mayor al 96%.

Tabla 8.4 Resultado del Criterio Planes hidrológicos 2010-2040.

Criterio Planes Hidrológicos	ENSAMBLE			UKMO_HAD1		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
	2010-2040	2010-2040	2010-2040	2010-2040	2010-2040	2010-2040
Escenario de Simulación	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)
Actual	100.0%	-	-	100.0%	-	-
1A	73.3%	96.7%	90.0%	53.3%	86.7%	53.3%
2A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2B	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
2C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3C	40.0%	66.7%	60.0%	30.0%	46.7%	33.3%
4A	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
4B	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
4C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Analizando los resultados del criterio de planes hidrológicos evaluados para los tres escenarios climáticos en el periodo de simulación 2010-2040 mostrado en la tabla anterior, podemos observar las garantías que se presentan para los escenarios de simulación para los dos modelos propuestos, el Ensamble multimodelo y Ukmo_Had1.

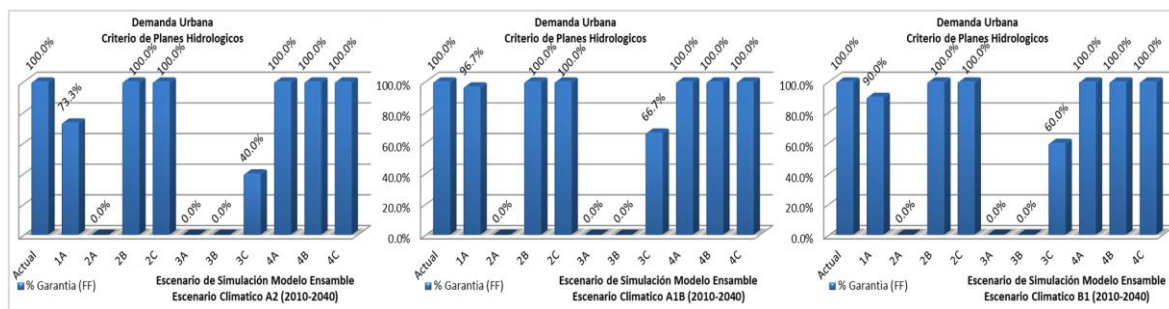


Fig. 8.12 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ensamble periodo 2010-2040 de los tres escenarios climáticos.

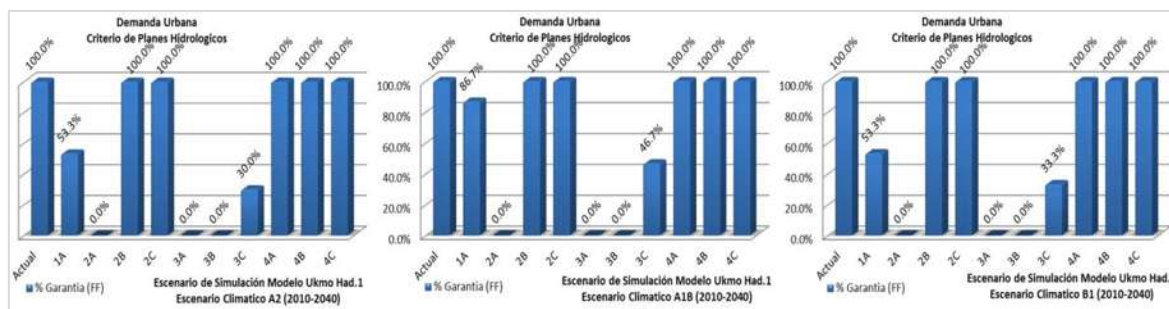


Fig. 8.13 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ukmo_Had1 periodo 2010-2040 de los tres escenarios climáticos.

En las gráficas del modelo Ensamble observamos que el escenario climático A1B es el que ofrece mejores garantías en el escenario de simulación 3C, que presenta una eficiencia en el sistema hidráulico del 50% y que plantea el uso conjunto del embalse aguas arriba del río Chiquito y el uso de los excedentes de la presa Cointzio, este valor nos indica que incrementando la demanda y la oferta del recurso hídrico para el 2040 tendríamos una garantía de agua del 66%, este solo para el primer periodo de simulación,

por lo que para los siguientes periodos esta garantía quedara nula. Teniendo como opción los escenarios 4 que proponen una eficiencia del sistema del 75% y así garantizar un poco más de agua para la demanda urbana en periodos siguientes.

En el caso del modelo Ukmo de igual manera que el modelo Ensamble, en el escenario climático A1B me ofrece mayor garantía en el escenario 3C, que de los tres escenarios de simulación que ofrecen aumento del recurso e incremento en la demanda, con eficiencia del 50% es el único que ofrece algo de garantía, dándonos 46.7% de garantía, que continua siendo poca, haciéndonos a la idea de dar mayor eficiencia al sistema tratando de llegar al 75% e implementar los escenarios 4AA, 4B y 4C.

Tabla 8.5 Resultado del Criterio Planes hidrológicos 2040-2070.

Criterio Planes Hidrológicos	ENSAMBLE			UKMO_HAD1		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
	2040-2070	2040-2070	2040-2070	2040-2070	2040-2070	2040-2070
Escenario de Simulación	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)
Actual	-	-	-	-	-	-
1A	60.0%	86.7%	86.7%	56.7%	73.3%	60.0%
2A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2C	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3C	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4A	23.3%	76.7%	53.3%	46.7%	63.3%	56.7%
4B	16.7%	60.0%	50.0%	40.0%	36.7%	50.0%
4C	23.3%	60.0%	53.3%	46.7%	40.0%	50.0%

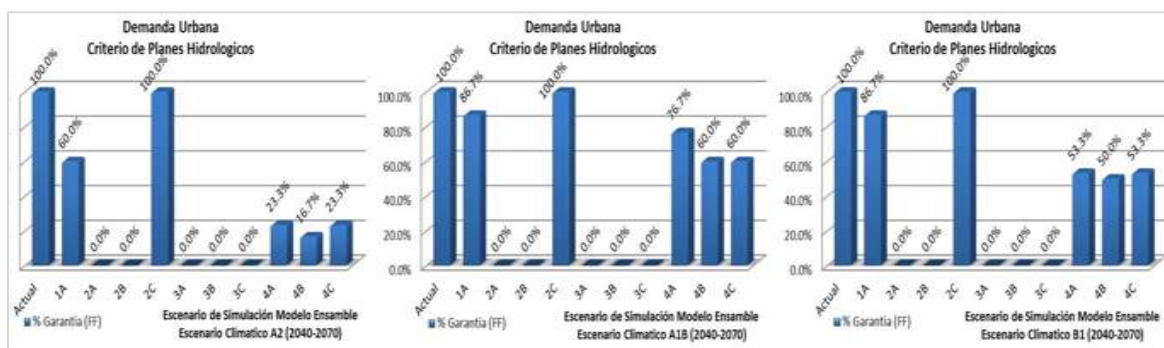


Fig. 8.14 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ensamble periodo 2040-2070 de los tres escenarios climáticos.

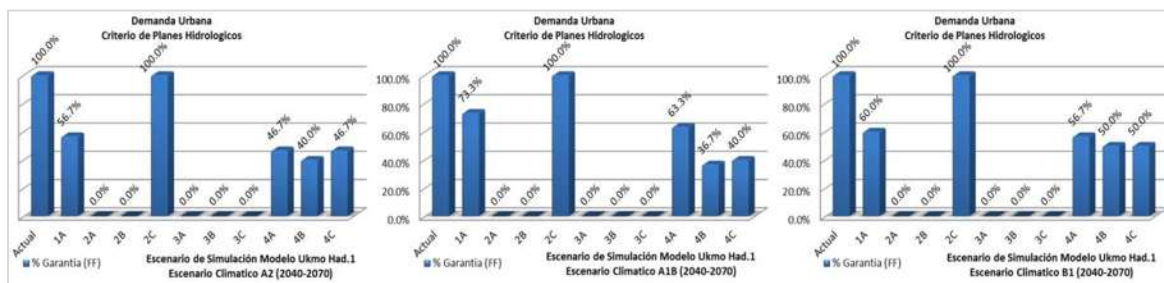


Fig. 8.15 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ukmo_Had1 periodo 2040-2070 de los tres escenarios climáticos.

Analizando el periodo 2040-2070 para el criterio de planes hidrológicos observamos que para el modelo Ensamble en los escenarios 3 que manda una eficiencia del 50%, no tenemos garantía alguna en ninguno de los escenarios climáticos. Y en los escenarios 4 que se habían presentados los mas favorables para la demanda urbana, empiezan a decrecer sus garantías, siendo el escenario climatico A1B donde presenta mas garantía, con la mejora del embalse del rio Chiquito del escenario 4A con 76.6% para este periodo.

Con el modelo Ukmo_Had1 se presenta el mismo caso que en el Ensamble, pero la garantía en el Escenario 4A del escenario climatico A1B presenta un valor menor de 63.3%.

Tabla 8.6 Resultado del Criterio Planes hidrológicos 2070-2100.

Criterio Planes Hidrológicos	ENSAMBLE			UKMO_HAD1		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
	2070-2100	2070-2100	2070-2100	2070-2100	2070-2100	2070-2100
Escenario de Simulación	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)	% Garantía (FF)
Actual	-	-	-	-	-	-
1A	30.0%	90.0%	100.0%	60.0%	60.0%	60.0%
2A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2C	0.0%	70.0%	76.7%	30.0%	50.0%	50.0%
3A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3C	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4A	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4C	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%



Fig. 8.16 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ensamble periodo 2070-2100 de los tres escenarios climáticos.



Fig. 8.17 Resultados del Criterio de Planes Hidrológicos para el modelo Ukmo_Had1 periodo 2070-2100 de los tres escenarios climáticos.

Continuando con el Criterio Planes Hidrológicos en el periodo 2070-2100, no tenemos garantía alguna, en ninguno de los tres escenarios climáticos, tampoco en cualquiera de los dos modelos de circulación. Observando el escenario de simulación 2C, el cual propone tener una eficiencia del sistema hidráulico al 100%, comienza a disminuir en su garantía, por lo tanto queda en duda que la solución sea la eficiencia al 75% el sistema de abastecimiento, puesto que al 2100 no tiene garantía mínima.

8.1.3 Análisis de resultados evaluados por el criterio UTAH DWR.

Otro criterio de evaluación de la demanda urbana es mediante el criterio UTAH DWR que maneja el Sistema de Apoyo a la Decisión AquaTool/SIMGES. En que su manera de evaluar la demanda urbana es mediante fallos en el transcurso de las simulaciones en nuestro caso empleamos los índices de, si en 1 año no abastece el 10% de la demanda anual crea fallo, si en dos años consecutivos deja de abastecer más del 16% de la demanda anual crea fallo y si en el periodo simulado se presenta en 10 años consecutivos una suma de mayor al 30% de desabastecimiento de la demanda anual crea fallo. Así que el criterio UTAH DWR cumple solo si estos 3 índices descritos cumplan.

Tabla 8.7 Resultados del escenario climático A2 por criterio UTAH DWR para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1.

CRITERIO UTAH DWR	ENSAMBLE									UKMO_HAD1								
	Escenario Climático A2									Escenario Climático A2								
	2010-2040			2040-2070			2070-2100			2010-2040			2040-2070			2070-2100		
	1 año	2 años	10 años	1 año	2 años	10 años	1 año	2 años	10 años	1 año	2 años	10 años	1 año	2 años	10 años	1 año	2 años	10 años
	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA	Deficit <10% DA	Deficit <16% DA	Deficit <30% DA
Actual	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-
1A	12.2%	23.4%	107.6%	14.3%	27.0%	114.1%	17.1%	32.1%	136.4%	18.5%	30.0%	116.2%	15.4%	29.7%	124.4%	19.6%	36.9%	153.3%
2A	33.2%	66.2%	321.1%	50.6%	99.6%	487.3%	63.0%	125.6%	615.4%	37.8%	73.9%	329.3%	51.2%	101.1%	490.0%	64.1%	127.2%	624.0%
2B	1.9%	3.9%	11.4%	22.6%	42.0%	189.4%	42.2%	83.2%	394.3%	7.2%	12.7%	18.7%	24.4%	46.1%	199.8%	44.8%	87.6%	414.1%
2C	0.0%	0.0%	0.0%	3.5%	5.7%	14.5%	26.1%	51.2%	231.1%	0.0%	0.0%	0.0%	4.9%	8.2%	21.8%	26.4%	50.2%	219.2%
3A	24.5%	48.1%	216.7%	45.0%	87.6%	416.3%	59.8%	115.8%	559.8%	34.2%	61.7%	228.0%	46.4%	90.9%	412.4%	60.8%	119.9%	576.9%
3B	24.4%	48.0%	213.5%	46.3%	88.7%	417.4%	60.7%	120.1%	573.9%	35.4%	69.2%	249.5%	49.3%	93.5%	425.8%	63.1%	124.3%	590.5%
3C	17.9%	34.9%	15.7%	42.7%	81.8%	373.1%	59.0%	113.0%	536.9%	33.6%	62.3%	178.3%	44.8%	87.6%	372.1%	60.3%	118.5%	558.1%
4A	1.9%	3.8%	8.6%	17.6%	31.5%	124.8%	39.7%	73.7%	339.6%	6.8%	9.9%	14.1%	19.6%	36.5%	119.0%	41.1%	79.8%	365.4%
4B	2.9%	4.5%	14.5%	19.5%	33.0%	126.4%	41.0%	80.1%	360.9%	7.3%	13.0%	27.6%	24.0%	40.3%	138.9%	44.6%	86.5%	385.8%
4C	1.9%	3.8%	11.8%	15.4%	25.0%	77.3%	38.6%	69.4%	305.4%	6.9%	9.9%	15.9%	18.2%	32.8%	79.0%	40.5%	77.8%	337.1%

En la Tabla 8.7 se muestran los resultados de las simulaciones del criterio UTAH DWR las cuales corresponden a las gráficas siguientes donde analizamos el escenario climático A2.

“MEDIDAS DE MITIGACIÓN AL EFECTO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DEMANDA URBANA DE LA CUENCA DEL RIO GRANDE DE MORELIA”

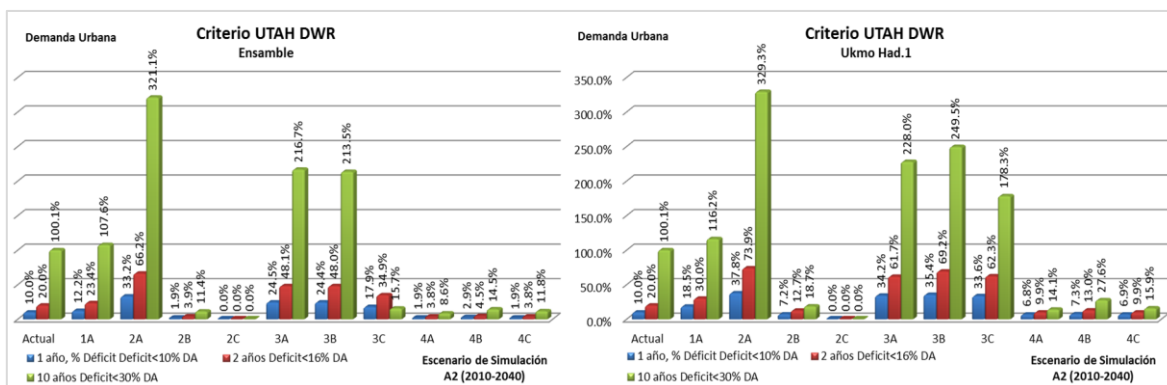


Fig. 8.18 Gráficos de resultados del escenario climático A2 por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2010-2040.

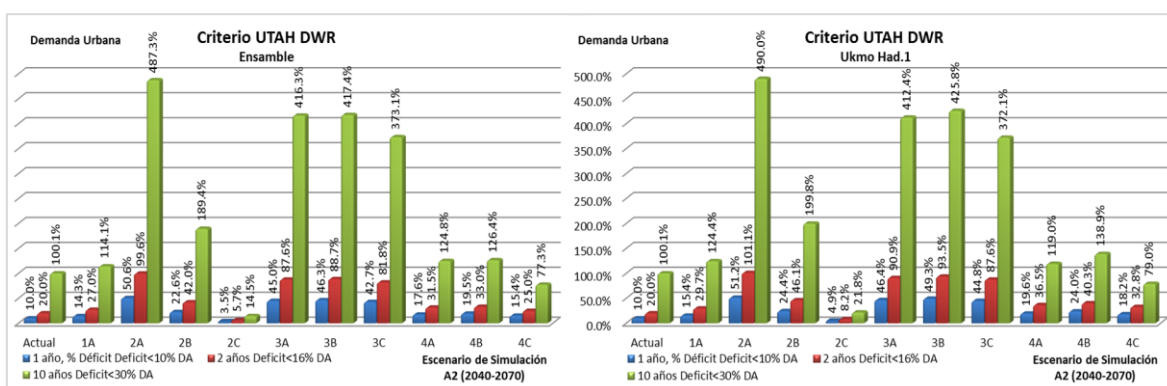


Fig. 8.19 Gráficos de resultados del escenario climático A2 por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2040-2070.

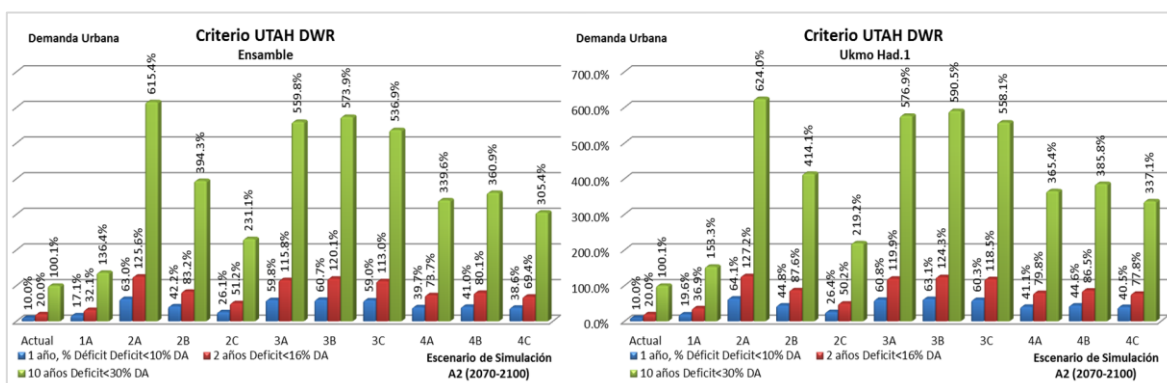


Fig. 8.20 Gráficos de resultados del escenario climático A2 por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2070-2100.

De las graficas anteriores podemos deducir que al analizar por este criterio, el escenario climatico A2 para los modelos planteados nos indica que para el 2040 los escenarios de simulacion, 2B y 2C referentes al incremento de la demanda con eficiencia del sistema hidraulico del 75% y al 100% respectivamente, son los que cumplen con estos parametros del criterio UTAH, y por consiguiente los escenarios de mejoramiento de oferta y demanda de los escenarios 4 que se desprenden del escenario de simulacion 2B.

Pero para los dos periodos siguientes, es decir para el 2070 y 2100 este criterio prevee un aumento en los valores del deficit de la demanda urbana de la cuenca del rio Grande de Morelia.

Tabla 8.8 Resultados del escenario climático A1B por criterio UTAH DWR para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1

CRITERIO UTAH DWR	ENSAMBLE									UKMO_HAD1								
	A1B									A1B								
	2010-2040			2040-2070			2070-2100			2010-2040			2040-2070			2070-2100		
	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA
Actual	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-
1A	11.1%	21.1%	101.2%	14.4%	27.0%	107.1%	14.0%	24.3%	104.4%	13.2%	24.3%	107.6%	14.3%	27.4%	118.2%	19.3%	37.3%	135.1%
2A	32.9%	64.1%	314.2%	50.2%	99.7%	480.0%	61.6%	122.7%	601.5%	34.5%	66.6%	321.3%	49.9%	99.8%	487.3%	64.0%	127.4%	617.2%
2B	1.9%	1.9%	2.9%	22.1%	42.6%	175.1%	39.6%	78.8%	367.4%	3.9%	4.9%	10.7%	21.8%	42.8%	190.9%	44.5%	87.7%	399.5%
2C	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	5.7%	6.5%	19.5%	38.5%	157.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	5.9%	16.5%	26.0%	50.5%	199.8%
3A	25.4%	44.4%	198.3%	43.8%	82.8%	389.5%	55.9%	109.9%	536.2%	24.9%	45.1%	206.6%	43.6%	83.7%	401.5%	60.6%	121.0%	563.8%
3B	23.8%	46.7%	193.5%	46.1%	90.1%	402.9%	58.3%	114.9%	539.4%	27.4%	50.4%	216.8%	46.0%	88.7%	417.4%	62.4%	124.7%	573.2%
3C	18.0%	30.6%	118.3%	40.0%	77.8%	340.6%	53.5%	105.5%	492.2%	20.7%	35.4%	140.3%	41.8%	77.6%	358.2%	60.8%	120.5%	536.1%
4A	1.9%	1.9%	1.9%	15.7%	24.2%	84.5%	33.8%	64.8%	304.3%	1.8%	1.8%	2.9%	15.4%	25.6%	102.5%	40.8%	81.5%	345.6%
4B	2.9%	4.9%	5.8%	19.2%	35.2%	104.7%	37.4%	72.4%	309.1%	4.5%	6.8%	17.1%	19.0%	33.1%	126.4%	43.6%	87.0%	359.8%
4C	1.9%	1.9%	1.9%	11.3%	19.9%	36.8%	30.3%	58.3%	238.3%	1.8%	1.8%	2.9%	13.7%	19.9%	59.9%	41.1%	80.7%	304.1%

Análisis de los resultados obtenidos para el escenario climático A1B para los modelos ensamble y ukmo_had1, la Tabla 8.8 muestra los resultados de las simulaciones realizadas, así como en la parte siguiente se denotan las gráficas correspondientes para la mejor comprensión de estos datos.

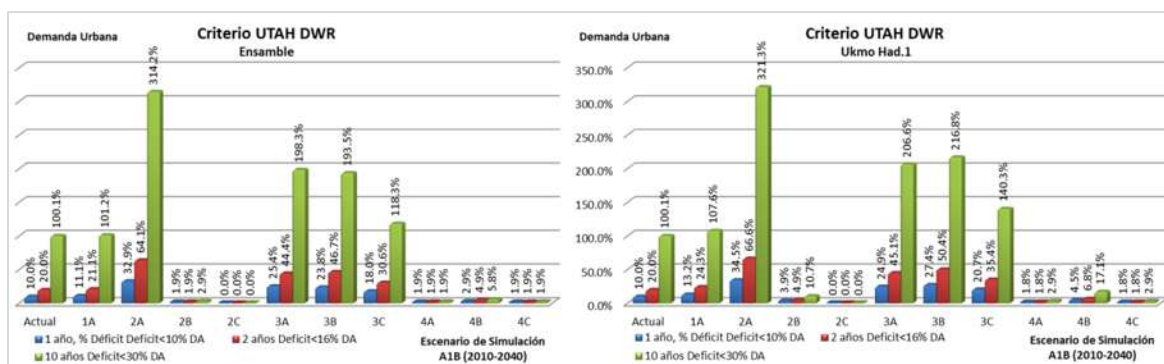


Fig. 8.21 Gráficos de resultados del escenario climático A1B por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2010-2040.

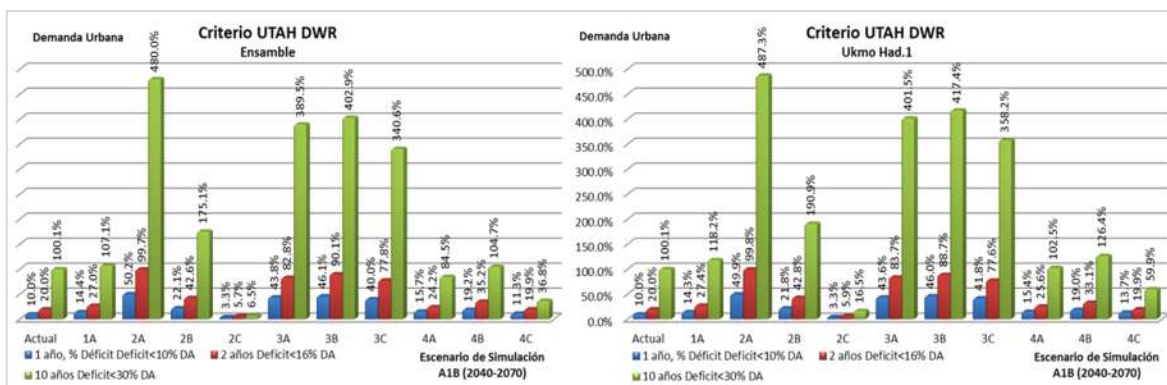


Fig. 8.22 Gráficos de resultados del escenario climático A1B por criterio UTAH DWR del modelo Ensemble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2040-2070.

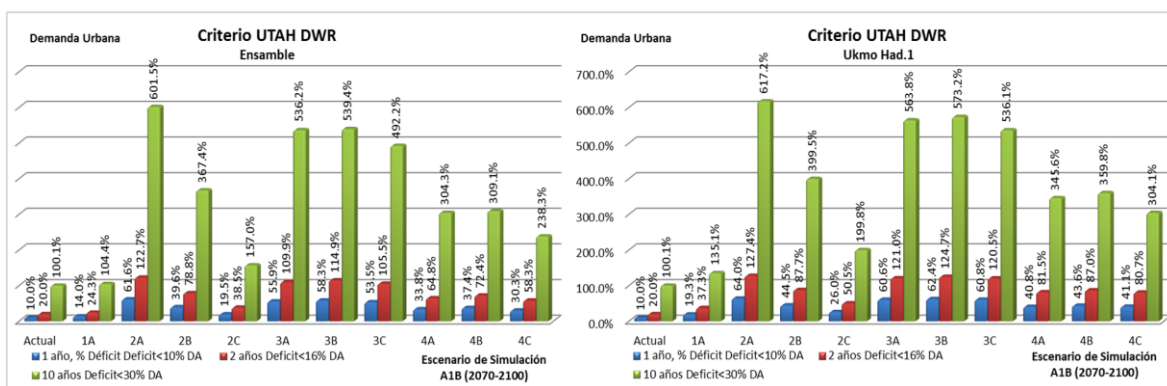


Fig. 8.23 Gráficos de resultados del escenario climático A1B por criterio UTAH DWR del modelo Ensemble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2070-2100.

Para este escenario climático A1B se vuelve a presentar el mismo efecto que para el escenario climático A2, pero cada uno con sus déficits. Al colocarnos en simulación del periodo 2010-2040 observamos como el déficit a 10 años crece bastante y muestra valores muy por arriba de los propuestos en ambos modelos, así que, si bien el escenarios 3B y 3C de eficiencias 75% y 100% es este periodo se vea una mejora en el déficit de manera inmediata con solo aumentar esta eficiencia, lamentablemente para los siguientes periodos comienzan a incrementarse los valores del déficit en cualquier índice del criterio. En este escenario se puede percibir que los déficits son menores que en el escenario climático A2 de manera significativa. Y de igual manera como se había comentado anteriormente, el modelo Ensemble proporciona un poco más de agua que Ukmo y esto a la larga se llega a considerar a futuro.

Tabla 8.9 Resultados del escenario climático B1 por criterio UTAH DWR para los modelos Ensamble y Ukmo_Had1.

CRITERIO UTAH DWR	ENSAMBLE									UKMO_HAD1								
	B1									B1								
	2010-2040			2040-2070			2070-2100			2010-2040			2040-2070			2070-2100		
	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA	1 año Deficit <10% DA	2 años Deficit <16% DA	10 años Deficit <30% DA
Actual	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-	10.0%	20.0%	100.1%	-	-	-	-	-	-
1A	11.1%	21.1%	102.3%	12.2%	22.2%	104.6%	10.0%	20.0%	100.1%	18.4%	30.0%	115.5%	14.3%	27.5%	120.5%	19.6%	36.2%	149.0%
2A	33.3%	66.1%	317.4%	49.1%	97.4%	480.0%	60.8%	121.1%	601.1%	37.8%	71.3%	326.0%	49.9%	99.9%	488.0%	64.1%	126.9%	621.4%
2B	1.9%	3.7%	5.8%	20.4%	38.0%	176.2%	28.1%	75.2%	366.5%	7.1%	10.4%	15.5%	22.7%	44.4%	193.7%	44.8%	87.0%	409.2%
2C	0.0%	0.0%	0.0%	2.5%	3.3%	7.5%	17.5%	33.7%	155.7%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%	7.0%	18.7%	26.4%	49.4%	212.6%
3A	25.1%	44.1%	207.3%	42.8%	82.6%	400.9%	55.5%	108.2%	533.7%	27.9%	52.1%	211.4%	42.5%	84.2%	401.1%	58.5%	115.5%	559.7%
3B	25.4%	48.8%	207.3%	43.2%	83.0%	397.0%	55.5%	109.8%	531.9%	35.4%	69.2%	243.9%	48.1%	92.7%	421.2%	63.1%	124.0%	587.7%
3C	19.6%	34.7%	134.9%	37.1%	72.2%	346.5%	51.6%	101.2%	489.1%	27.3%	53.1%	165.7%	41.9%	80.4%	361.3%	58.4%	114.9%	541.1%
4A	1.9%	1.9%	3.9%	14.2%	24.0%	101.7%	33.3%	62.3%	300.5%	0.0%	0.0%	0.0%	13.8%	26.3%	102.0%	37.8%	73.3%	339.6%
4B	3.4%	5.8%	11.1%	14.9%	25.1%	95.7%	33.2%	64.7%	297.8%	7.3%	13.0%	24.6%	22.2%	39.1%	132.1%	44.6%	86.5%	381.5%
4C	2.9%	2.9%	5.0%	7.7%	12.3%	42.2%	27.5%	51.9%	233.7%	0.0%	0.0%	0.0%	14.0%	23.5%	64.2%	37.5%	72.4%	311.6%

Para analizar este escenario climático B1 que es el escenario mas optimista de los tres evaluados, debe presentar una disminucion del deficit a futuro. En la Tabla 8.9 se puede observar de manera numerica las graficas presentadas ensiguida para el modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1.

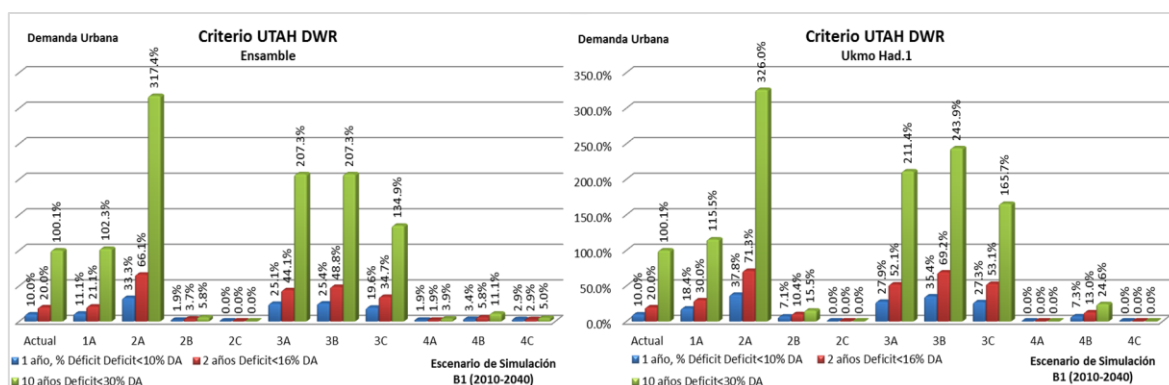


Fig. 8.24 Gráficos de resultados del escenario climático B1 por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2010-2040.

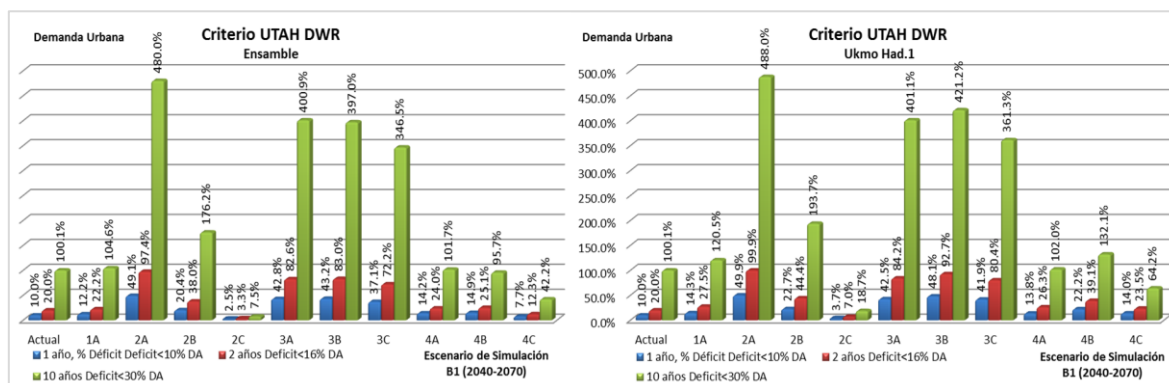


Fig. 8.25 Gráficos de resultados del escenario climático B1 por criterio UTAH DWR del modelo Ensamble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2040-2070.

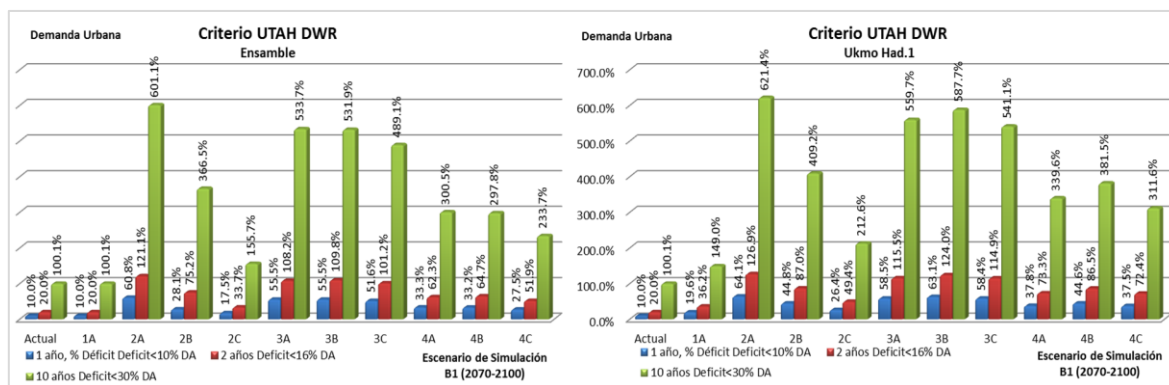


Fig. 8.26 Gráficos de resultados del escenario climático B1 por criterio UTAH DWR del modelo Ensemble frente al Ukmo_Had1 en el periodo 2070-2100.

Observando las gráficas decimos que el escenario climático B1 llega a disminuir muy poco el déficit respecto al escenario climático A1B. Así que se puede decir que cualquiera de los dos escenarios climáticos el A1B y B1 en ambos modelos es favorable de considerar, puesto que sus resultados vienen dando similitudes en cuanto a comportamiento y datos muy parecidos.

9 Conclusiones y recomendaciones.

Es inminente que el cambio climático y sus efectos nos están afectando nuestro ecosistema, mismo que nosotros creamos y el mismo que estamos destruyendo para ello es necesario hacerle frente a los elementos que producen dicho cambio climático, como lo son los gases de efecto invernadero, que son la principal causa de que las variables climáticas se verán afectadas como el incremento de la temperatura y a la disminución de la precipitación y por lo tanto es importante desarrollar investigación de manera integral que nos permitan planificar los recursos para el futuro.

Para ello se implementa la modelación del clima a partir los Modelos de Circulación General Atmosférica (MCGAO-A) ya que son confiables por tener un fundamento teórico. Estos modelos representan la evolución del clima a lo largo del tiempo.

Como hemos comentado, la temperatura del planeta se está incrementando debido a gases de efecto invernadero (GEI) y la precipitación se está reduciendo, por lo que analizamos tres escenarios climáticos, A2, A1B y B1 para conocer su comportamiento hasta el año 2100 en series de 30 años, 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Estos los analizamos junto con los escenarios de simulación.

Los escenarios de simulación del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Grande de Morelia para la demanda urbana fueron elaborados mediante el programa SIMGES perteneciente al Sistema de Apoyo a la Decisión AquaTool. 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.

La demanda urbana depende directamente 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 tendencia que presenta la línea evolutiva del escenario climático A2 que se considera el escenario más pesimista.

Hoy en día es primordial el manejar herramientas informáticas que nos auxilien a resolver problemas complejos de una manera más sencilla. Así como para tomar la decisión correcta, puesto que a efectos de analizar los sistemas de forma particular y de plantear dudas clásicas relacionadas con los usos (demandas) y los recursos, así como el impactos del cambios climáticos, será necesario el implementar herramientas avanzadas tecnológicamente.

9.1 Problemas en la demanda urbana

Los principales usos consuntivos del agua son en primer lugar el agrícola (87.9%), seguido del uso público urbano (5.4%) y el industrial (3.7%), el resto del agua (3%) se reparte entre los usos pecuario y otros. Por tal motivo la población debe aprender a manejar de manera eficiente este recurso. Porque en la actualidad tenemos que

contemplar los efectos del cambio climático que cada vez son más persistentes en zonas terciarizadas o donde la gente no tiene cultura de conservación del medio ambiente.

Difundir de manera general, la predicción de los efectos del cambio climático permitirá a las entidades gubernamentales y especialistas en el estudio del medio ambiente, establecer medidas preventivas que permitan mitigar la aparición de fenómenos naturales como: inundaciones, huracanes y sequías; fomentando así la correcta explotación de los recursos de la región.

Por lo tanto uno de los principales problemas que enfrenta la gestión de los recursos hídricos son las elevadas pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento y distribución, ocasionado por el insuficiente mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura existente. Se considera que en la región la eficiencia en el suministro de agua en zonas rurales y urbanas es de apenas el 50%. Si se incrementara la eficiencia a un 75%, el abastecimiento del recurso hídrico estaría garantizado al 2100, siempre y cuando se adopten medidas medioambientales para reducir lo que el hombre ha provocado con el cambio climático. Puesto que actualmente toda la infraestructura hidráulica se diseña con las condiciones climáticas históricas y actuales, sin embargo para el futuro y debido a que el clima se encuentra en constante cambiando esta infraestructura puede ser insuficiente o inadecuada.

Una de las alternativas para dar respuesta a las futuras demandas y restablecer volúmenes considerables de agua, es incrementando la eficiencia mediante la rehabilitación y modernización de la infraestructura hidráulica, así como la implementación de nuevos elementos de conducción para satisfacer principalmente la demanda urbana.

A todos estos problemas en el suministro de agua le sumamos el efecto del cambio climático se agravara la manera de obtener este recurso. Ya no solo bastaría de rehabilitar y proponer nuevas conducciones, sino de plantear políticas para conservar y manejar de manera eficiente y óptima el agua dulce.

Debido a que el uso urbano del agua tiene mayor prioridad, es indispensable para los operadores del sistema tratar de optimizar y suministrar el volumen demandado para satisfacer a la población. Es por ello que se han propuesto escenarios que prometen mejorar y optimizar el abastecimiento, el proponer obras de conducción y almacenamiento superficial, pero esto no garantiza por si solo el suministro de las demandas urbanas de la cuenca, también tiene que ver la cultura y el criterio que la gente adopte ante la posibilidad de que el agua dulce se está agotando y cada día es más difícil explotarlo

9.2 Recomendaciones

El implementar Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables (DUIS), que son como pequeñas ciudades-fraccionamientos pero con carácter amigable con el medio ambiente, en el cual se reutiliza el agua desaguada por las viviendas para enviarlas a plantas potabilizadoras para darle a estas aguas un uso mejor, así como estas aguas salidas de la planta potabilizadora canalizarlas para recargar al acuífero. También proponer zonas de

recarga para el acuífero Morelia-Querendaro del cual se abastece la ciudad de Morelia y otras colindantes.

Promover ampliar la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Así como implementar nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales o de riego.

Gestionar mecanismos de la regulación en la extracción de volúmenes de agua y así evitar la sobreexplotación de los acuíferos, es decir, fomentar la recuperación de los mismos para el día de mañana tener un recurso semi-renovable. Lograr el manejo integral y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.

Concientizar a los usuarios y comité encargado de la administración de los recursos hídricos y fomentar la reutilización de agua tratada.

Mejorar la calidad del agua de los ríos y cuerpos de agua a través de tratamiento adecuado de las aguas residuales e industriales e implementarlas en el sector agrícola en remplazo del agua de primer uso que utilizan para riego.

Lograr el reúso del agua residual tratada en las actividades que no requieran calidad potable, como una forma de no incrementar más las extracciones de agua y permitir la recuperación ambiental. Aumentar la cultura del buen uso del agua.

10 Bibliografía

Plan Municipal de Desarrollo. Morelia 2012-2015.

Comisión Nacional del Agua y Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. “Estadísticas del agua en México”. México, .F., 2011.

Barajas J. 2000. “Simulación de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Grande de Morelia” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán, México.

Cervantes O. 2002. “Modelo de gestión de recursos hídricos para la demanda urbana de Morelia, Michoacán” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán, México.

Gaytan R. 2005 “Reglas de operación del sistema del río Grande de Morelia, enfocadas al uso agrícola”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán, México.

Hernández B. 2012. “Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán, México.

García D. “Metodología para la obtención de gastos con efectos del cambio climático para la cuenca del río Grande de Morelia” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Michoacán, México.

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”

Panel Intergubernamental del Cambio Climático. “Modelos de Circulación General de la Atmosfera”. 4to Informe., Ginebra, Suiza, 2007.

Instituto Nacional de Ecología. INE/A1-006/2007 “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”. México, D.F., México, 2007.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)

http://operativos.inegi.org.mx/sistemas/iter/entidad_indicador.aspx?ev=5

<http://www.ipcc.ch>

<http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>

<http://escenarios.inecc.gob.mx/>