



**UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Evaluación del impacto del cambio climático en los
recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, Michoacán.**

PROYECTO DE TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta

Liliana García Romero

Ingeniera civil

Director de Tesis:

Doctor en Ciencias de Ingeniería

Marco Antonio Martínez Cinco

Co-Directora de Tesis:

Doctora en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Morelia, Michoacán, Septiembre de 2015

Índice

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1 Cambio Climático	17
2.2 Gases efecto invernadero y el calentamiento global.....	18
2.3 Evidencias del cambio climático.....	20
2.3.1 Eventos Meteorológicos extremos	24
2.4 Escenarios de emisiones de gases efecto invernadero (o GEI).....	26
2.4.1 Escenarios RCP de emisiones a la atmósfera	29
2.5 Modelos de Circulación General (o MGC)	33
2.6 Modelos Matemáticos.	40
2.6.1 Modelos de simulación hidrológica	41
2.6.2 Modelo hidrológico de Témez.....	46
2.6.3 Modelo hidrológico HBV	52
2.6.4 Herramientas de modelación: EVALHID Y PATRICAL.....	59
2.6.5 Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.....	63
2.7 Michoacán ante el cambio climático.....	67
3. HIPÓTESIS.....	70
4. OBJETIVOS.....	71
4.1 General	71
4.2 Particulares	71
5 JUSTIFICACIÓN.....	73
6 METODOLOGÍA.....	77
6.1 Análisis y caracterización de la zona en estudio.....	77
6.2 Recopilación de información y datos.....	77
6.3 Análisis y validación estadística de la información.....	78
6.4 Aplicación del modelo lluvia-escurrimiento para la serie histórica.....	78
6.5 Aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.....	79
6.6 Modelación incluyendo escenarios de cambio climático	79

6.6.1	Determinación de los modelos y escenarios.....	80
6.6.2	Obtención de series con efecto del cambio climático.	81
6.6.3	Metodología para tratamiento de datos de cambio climático.	82
6.7	Comparación de resultados de la modelación hidrológica (periodo actual vs cambio climático)	84
6.8	Análisis de resultados	84
7	RESULTADOS	86
7.1	Conocimiento de la zona en estudio	86
7.2	Demanda Urbana.....	93
7.2.1	Proyección de la población.....	93
7.2.2	Proyección de la demanda	96
7.3	Demanda Agrícola	98
7.3.1	Cultivos principales.....	100
7.4	Demanda Industrial.....	103
7.5	Información Meteorológica.....	104
7.5.1	Selección de estaciones principales.....	104
7.5.2	Homogeneidad o consistencia de datos.....	105
7.5.3	Independencia de las series de precipitación.	107
7.5.4	Estimación de datos faltantes de las series de precipitación.....	109
7.5.5	Evaluación de estadísticos básicos	110
7.6	Información hidrométrica o de gasto.....	111
7.6.1	Evaluar dependencia de la serie histórica	112
7.7	Modelación hidrológica	114
7.7.1	Modelación hidrológica con la herramienta EVALHID	115
7.7.1.1	Modelo de Témez.....	115
7.7.1.1.1	Calibración	118
7.7.1.1.2	Restitución a régimen natural.....	124
7.7.1.1.3	Modelación de los escurrimientos	128
7.7.1.2	Modelo HBV	130
7.7.1.2.1	Calibración	131
7.7.1.2.2	Modelación de los escurrimientos	136

7.7.2	Modelación hidrológica con la herramienta PATRICAL	138
7.7.2.1	Calibración	141
7.7.3	Modelación hidrológica con la NOM-011-CONAGUA-2015.	151
7.8	Modelación hidrológica con cambio climático	156
7.8.1	Series de cambio climático	156
7.8.2	Validación estadística de las series	157
7.8.3	Modelación de los escurrimientos utilizando las herramientas EVALHID Y PATRICAL.....	159
7.8.4	Modelación de los escurrimientos utilizando la NOM-011-CONAGUA-2015.....	163
8	CONCLUSIONES	168
9	BIBLIOGRAFÍA.....	173
	ANEXO 1. MÉTODO DE THORNTHWAITE	179
	ANEXO 2. MÉTODOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN	180
	ANEXO 3. MÉTODO PARA ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES: INVERSO DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA AL CUADRADO.....	183

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Eventos climáticos extremos recientes en México (1988-2010). _____	25
Tabla 2.2 Escenarios RCP. (Moss, et al., 2010) _____	32
Tabla 2.3 Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG). Enlista los 15 MCG que fueron utilizados por el INECC para general el nuevo modelo ensamble de donde provienen las series de precipitaciones y temperaturas utilizadas en las modelaciones de cambio climático. _____	37
Tabla 2.4 Rangos para los parámetros de calibración del modelo de Témez (Témez, 1977). _____	52
Tabla 2.5 Parámetros del modelo HBV. Descripción y rangos. _____	58
Tabla 7.1 Datos censales para las poblaciones de la cuenca del río Tuxpan (INEGI, Varios años). _____	95
Tabla 7.2 Método de proyección de la población empleado para cada municipio de acuerdo con las tendencias de crecimiento o decaimiento de la población en cada caso. _____	95
Tabla 7.3 Proyección de la población por cada municipio. Finalmente se muestra la proyección de la población a nivel de cuenca. _____	96
Tabla 7.4 Consumos domésticos per cápita _____	97
Tabla 7.5 Clasificación de climas por su temperatura (Tabla 2) _____	97
Tabla 7.6 Proyección total de la demanda urbana. Se anexa en esta tabla las proyecciones de la demanda a 25, 75 y 90 años, que serán requeridas en la modelación con cambio climático. _____	98
Tabla 7.7 Usuarios y superficies por tipo de Tenencia. _____	100
Tabla 7.8 Cauces principales en el módulo de riego 04. _____	101
Tabla 7.9 Canales de abastecimiento del módulo de riego 6 (Santiago-Tuxpan) _	102
Tabla 7.10 Tomas de agua sobre el canal principal dadas en Mm ³ , incluye longitudes y ubicación geográfica. _____	103
Tabla 7.11 Demanda industrial por título en la cuenca del río Tuxpan. _____	103
Tabla 7.12 Características de las estaciones seleccionadas. _____	105
Tabla 7.13 Resultados de pruebas de consistencia aplicadas a las series de precipitación. _____	106
Tabla 7.14 Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación para la estación meteorológica con clave 16020. _____	107
Tabla 7.15 Resultados de la prueba de independencia de estaciones principales. _____	108
Tabla 7.16 Comparativa de estadísticos básicos para la estación 16020, antes y después del llenado de datos. _____	111
Tabla 7.17 Tabla resumen de estaciones hidrométricas que está dentro de la cuenca del río Tuxpan. _____	111
Tabla 7.18 Límites de Anderson y coeficiente de auto-correlación de la estación de gasto 18459. _____	112

Tabla 7.19 Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación de la estación hidrométrica 18460. _____	113
Tabla 7.20 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007). _____	119
Tabla 7.21 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007). _____	120
Tabla 7.22 Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson. _____	120
Tabla 7.23 Rangos para la evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan (Moriasi et al., 2007). _____	128
Tabla 7.24 Parámetros e indicadores de ajuste de las zonas modeladas. _____	128
Tabla 7.25 Distribución de la precipitación en el ciclo del agua simulado por el modelo de Témez para el periodo de 1952-2010. _____	129
Tabla 7.26 Parámetros de calibración. _____	135
Tabla 7.27 Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan (Moriasi et al., 2007). _____	135
Tabla 7.28 Indicadores de ajuste. _____	135
Tabla 7.29 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo HBV. _____	137
Tabla 7.30 Resumen de parámetros del modelo de Témez (ecuaciones aplicadas de manera distribuida). _____	150
Tabla 7.31 Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan. (Moriasi et al., 2007). _____	151
Tabla 7.32 Resumen de parámetros e indicadores de ajuste de la modelación de la cuenca del río Tuxpan, utilizando la herramienta PATRICAL. _____	151
Tabla 7.33 Resumen de los escurrimientos medios anuales en cada subcuenca de modelación, obtenidos con la NOM-011 en hm ³ /año _____	155
Tabla 7.34 Resumen de las pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las estaciones de cambio climático. _____	158
Tabla 7.35 Resumen de la prueba de independencia a las series de cambio climático. _____	158
Tabla 7.36 Proyección del escurrimiento promedio anual por subcuenca para el periodo de 2015-2039 considerando la variable de cambio climático bajo el escenario RCP 6.0. _____	165
Tabla 7.37 Comparativa entre los escurrimientos calculados con los diferentes modelos hidrológicos y la NOM-011-CONAGUA-2015, para el periodo histórico y las proyecciones de cambio climático. _____	165
Tabla 7.38 Comparativa entre las aportaciones obtenidas con los modelos hidrológicos y las estaciones hidrométricas de gasto. _____	167
Tabla 7.39 Resumen de aportaciones en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (1952-2010) para cada uno de los modelos utilizados. _____	167

Índice de figuras

Figura 2.1 Vulnerabilidad actual de los recursos de agua dulce y de su gestión en el mundo. El estrés hídrico es un concepto que describe en qué medida está expuesta la población al riesgo de falta de agua. _____	24
Figura 2.2 Esquema del modelo de Témez _____	47
Figura 2.3 Esquema general del modelo HVB _____	54
Figura 2.4 Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico en PATRICAL. _____	63
Figura 2.5 Desastres de origen hidrometeorológico ocurridos en el estado de Michoacán (periodo 1980-2001). _____	67
Figura 5.1 Grado de presión sobre los recursos hídricos por región hidrológico-administrativa, 2010. _____	75
Figura 5.2 Ubicación espacial de la cuenca del río Tuxpán _____	76
Figura 6.1 Esquema metodológico del tratamiento aplicado a las series de cambio climático. _____	84
Figura 6.2 Metodología empleada. _____	85
Figura 7.1 Localización de la cuenca del río Tuxpan en la región hidrológica número 18 Balsas. _____	87
Figura 7.2 Ubicación espacial de la zona en estudio. Carreteras y poblaciones en la cuenca del río Tuxpan. _____	88
Figura 7.3 Mapa de relieve en la cuenca del río Tuxpan. _____	88
Figura 7.4 Presas y cuerpos de agua. Existen tres presas importantes: Sabaneta, Pucuato y Agostitlán. _____	89
Figura 7.5 Red de drenaje en la cuenca del río Tuxpan. Cauces principales y secundarios. _____	89
Figura 7.6 Usos que se dan al suelo en la cuenca del río Tuxpan _____	90
Figura 7.7 Tipos de suelo en la cuenca del río Tuxpan _____	90
Figura 7.8 Acuífero Ciudad-Hidalgo Tuxpan _____	91
Figura 7.9 Formaciones geológicas (tipos de roca) en la cuenca del río Tuxpan _____	91
Figura 7.10 Áreas naturales protegidas. Santuario de la mariposa Monarca. _____	92
Figura 7.11 Municipios involucrados en la cuenca en estudio. _____	94
Figura 7.12 Climas predominantes en la región. Éstos deben compararse con los valores de temperaturas medias presentados en la tabla 7.5 para obtener la dotación. _____	97
Figura 7.13 Distrito de riego 045, Tuxpan. _____	99
Figura 7.14 Módulos del distrito de Riego 045 _____	101
Figura 7.15 Estaciones meteorológicas. Visualización espacial de estaciones meteorológicas seleccionadas. _____	104

Figura 7.16 Correlograma de la estación con clave 16020, que muestra la independencia temporal de la serie al graficar su comportamiento dentro de los límites de Anderson.	108
Figura 7.17 Ubicación espacial de las estaciones hidrométricas en la cuenca. ___	112
Figura 7.18 Correlograma de la estación hidrométrica 18459. Puede observarse la dependencia temporal de la serie histórica, al quedar graficada fuera de los límites de Anderson.	113
Figura 7.19 Correlograma de la estación hidrométrica 18460. Muestra la dependencia de la serie de gasto.	114
Figura 7.20 Delimitación de las microcuencas del río Tuxpan.	116
Figura 7.21 Zonas de calibración para la cuenca del río Tuxpan.	117
Figura 7.22 Polígonos de Thiessen para la cuenca de río Tuxpan utilizando las 13 estaciones climatológicas principales.	118
Figura 7.23 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.	121
Figura 7.24 resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.	121
Figura 7.25 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.	122
Figura 7.26 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.	122
Figura 7.27 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.	122
Figura 7.28 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.	123
Figura 7.29 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato.	123
Figura 7.30 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato.	123
Figura 7.31 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato.	124
Figura 7.32 Afectaciones antropogénicas en la estación hidrométrica 18459. ___	126
Figura 7.33 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.	127
Figura 7.34 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.	127
Figura 7.35 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.	127
Figura 7.36 Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan (Moriasi et al., 2007).	128
Figura 7.37 Parámetros e indicadores de ajuste zonas modeladas.	128

Figura 7.38 Comportamiento de las precipitaciones y resultado de la simulación de los escurrimientos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de Témez. _____	129
Figura 7.39 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de Témez. _____	130
Figura 7.40 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero con el modelo HBV. _____	131
Figura 7.41 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero con el modelo HBV. _____	131
Figura 7.42 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Anganguero con el modelo HBV. _____	131
Figura 7.43 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV. _____	132
Figura 7.44 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV. _____	132
Figura 7.45 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV. _____	132
Figura 7.46 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV. _____	133
Figura 7.47 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV. _____	133
Figura 7.48 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV. _____	133
Figura 7.49 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV. _____	134
Figura 7.50 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV. _____	134
Figura 7.51 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV. _____	134
Figura 7.52 Comportamiento de las precipitaciones y resultado de la simulación de los escurrimientos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo HBV. _____	136
Figura 7.53 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de HBV. _____	137
Figura 7.54 Discretización de la cuenca para la calibración. _____	139
Figura 7.55 Mapas mensuales de precipitación (derecha) y temperatura (izquierda) para la cuenca del río Tuxpan. _____	140
Figura 7.56 Subcuenca del río Anganguero. _____	141
Figura 7.57 Uso de suelo en la subcuenca del río Anganguero _____	142
Figura 7.58 Geología de la subcuenca del río Anganguero _____	142

Figura 7.59 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Angangueo. _____	143
Figura 7.60 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Angangueo. _____	143
Figura 7.61 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Angangueo. _____	144
Figura 7.62 Subcuenca de calibración de la presa Agostitlán _____	144
Figura 7.63 Resultados mensuales de calibración para a presa Agostitlán. _____	145
Figura 7.64 Resultados anuales de calbarción para la presa Agostitlán. _____	145
Figura 7.65 Resultados año medio para la presa Agostitlán. _____	146
Figura 7.66 Subcuenca de calibración de las presas Sabaneta y Pucuato. _____	146
Figura 7.67 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato. _____	147
Figura 7.68 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato. _____	147
Figura 7.69 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato. _____	147
Figura 7.70 Subcuenca de calibración del río Grande o Tuxpan. _____	148
Figura 7.71 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Grande o Tuxpan. _____	148
Figura 7.72 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de río Tuxpan. _____	149
Figura 7.73 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan. _____	149
Figura 7.74 Usos de suelo que se tienen en la cuenca del río Tuxpan. _____	152
Figura 7.75 Tipo de textura del suelo en la cuenca del río Tuxpan. _____	153
Figura 7.76 Parámetro K, para cada subcuenca de la zona en estudio. _____	154
Figura 7.77 Mapa de Isoyetas de la cuenca del río Tuxpan. _____	155
Figura 7.78 Estaciones de cambio climático que tienen influencia en la zona de estudio. _____	157
Figura 7.79 Figura que describe la tendencia histórica de las precipitaciones para los periodos 1952-2010; y proyecciones de las mismas con cambio climático para los periodos 2015-2039 y 2075-2099. _____	159
Figura 7.80 Gráfica que describe la tendencia histórica de las temperaturas para los periodos 1952-2010; y proyecciones de las temperaturas con cambio climático para los periodos 2015-2039 y 2075-2099. _____	160
Figura 7.81 Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (1952-2010) obtenido con el modelo HBV. _____	161
Figura 7.82 Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (2015-2039) obtenido con el modelo HBV para el escenario de cambio climático RCP 4.5. _____	162

- Figura 7.83** Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (2039-2099) obtenido con el modelo HBV para el escenario de cambio climático RCP 4.5 _____ 162
- Figura 7.84** Mapa de isoyetas para la cuenca del río Tuxpan. Periodo 2015-2039 para el escenario RCP 6.0. _____ 164
- Figura 7.85** Comparativa de los volúmenes obtenidos con los diferentes modelos hidrológicos para los escenarios actual y de cambio climático, para los periodos de 1952-2010 (actual), 2015-2039 y 2075-2099 (proyecciones de cambio climático). 166

RESUMEN

El uso inadecuado de los recursos naturales ha provocado que existan cambios irreversibles en nuestro planeta. El abuso en el empleo de combustibles fósiles utilizados en las actividades humanas (carbón, petróleo, gasolinas, diesel, gas natural y los combustibles derivados del petróleo), así como la tala inmoderada, incendios forestales y contaminación del agua y suelo; son las principales causas de que se presenten fenómenos naturales que provoquen desastres en el país.

El cambio climático es inminente, sin embargo sus efectos pueden ser controlados. Hemos notado que existen incrementos en la temperatura global del planeta y alteraciones en el ciclo hidrológico que se ven reflejadas en la disminución de la precipitación.

El cambio climático provocará afectaciones importantes en sectores importantes en el país, el sector hídrico no será la excepción. Se estima que la disminución en las precipitaciones para el futuro sea de aproximadamente un 10%, además de que se estima que las temperaturas irán en aumento.

Es importante que se realicen estudios sobre las afectaciones del cambio climático en los recursos hídricos en una cuenca; de esta manera se pueden hacer planeaciones a futuro y estimaciones de los daños que este fenómeno pueda ocasionar.

Los escenarios de cambio climático y los modelos de circulación general son sólo proyecciones que se tienen para estudiar el sistema climático, más no son resultados contundentes, sin embargo son la única herramienta con que se cuenta actualmente para estudiar el clima.

Es común pensar que el cambio climático solo se manifestara en incrementos en las temperaturas, sin embargo no es así. Por ello, es necesario identificar cuáles serán los sectores más vulnerables al cambio climático y conocer sus implicaciones en los mismos.

Palabras clave: cuenca, cambio climático, recursos hídricos, proyecciones, medidas.

ABSTRACT

Misuse of natural resources has caused irreversible changes exist on our planet. Abuse in the use of fossil fuels used in human activities (coal, oil, gasoline, diesel, natural gas and petroleum fuels) and excessive logging, forest fires and water pollution and soil; are the main causes of natural phenomena that cause disasters in the country are presented.

Climate change is imminent, but its effects can be controlled. We have noticed that there are overall increases in global temperatures and changes in the hydrological cycle are reflected in the decrease in precipitation.

Climate change will cause significant damages in important sectors in the country, the water sector is no exception. It is estimated that the decrease in precipitation for the future is approximately 10%, plus it is estimated that the temperature will increase.

It is important that studies on the effects of climate change are made on water resources in a watershed; this way you can make future plannings and estimates of the damage that this phenomenon may cause.

The climate change scenarios and GCMs are projections only have to study the climate system, the results are not conclusive, but they are the only tool that is currently studying the climate.

It is common to think that climate change is only manifested in increased temperatures, however it is not. It is therefore necessary to identify the most vulnerable to climate change and will know their implications in them.

Keywords: basin, climate change, water resources, projected measures.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento indispensable para la existencia de vida en nuestro planeta, todos los seres vivos que habitamos la Tierra necesitamos de ella para sobrevivir. Desafortunadamente la disponibilidad del recurso agua en el planeta está disminuyendo, esto se debe al mal uso y tratamiento que damos a las aguas que utilizamos para satisfacer nuestras necesidades y a las variables climáticas que limitan la disponibilidad de agua. En los últimos años se ha hablado exponencialmente de variables climáticas, como el cambio climático, que están afectando considerablemente sectores importantes para la sociedad.

El concepto de cambio climático, surge por primera vez en el siglo XIX, como resultado de estudios geológicos que encontraron, que desde épocas prehistóricas, la Tierra había presentado variaciones en el clima. Durante mucho tiempo se discutió acerca de los impactos que la actividad humana pudiera tener en dichos cambios, pero fue en los años 60's que la evidencia científica comenzó a apoyar la noción de que las actividades de origen antropogénico pudieran en realidad estar afectando el clima global. (Martínez *et al.*, 2004).

El efecto invernadero es un fenómeno natural que permite la vida en el planeta. Es causado por los gases que forman parte de la atmósfera, conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones de estos gases, producto de actividades de origen antropogénico, han sido la principal causa del inusual calentamiento del planeta durante los últimos 150 años (Barrios *et al.*, 2005; IPCC, 2007).

El cambio climático es un problema ambiental con características únicas, ya que es de competencia global, se plantea que sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos), procesos sociales, económicos y políticos de índole mundial.

A través del tiempo el uso inadecuado de los recursos naturales, el estilo de vida que poco a poco ha ido creando el ser humano, las nuevas tecnologías y el desarrollo industrial; han provocado que existan cambios irreversibles en nuestro

planeta; como consecuencia, en los últimos años a nivel mundial se han presentado eventos meteorológicos extremos que han sido atribuidos al cambio climático.

En América Latina algunos sectores y sistemas serían especialmente vulnerables, debido a su posición geográfica. Es muy probable que los recursos hídricos se vean disminuidos entre un 10% y 30%. (SEMARNAT, 2009).

Se estima que el 15% del territorio nacional de México, el 68.2% de su población y el 71% de su PIB se encuentran altamente expuestos al riesgo de impactos adversos asociados con el cambio climático. México presenta también una situación de alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático por estar situado en varias zonas climáticas. (SEMARNAT, 2009).

Gran parte de las necesidades del agua en México son abastecidas mediante los recursos hídricos superficiales, ¿Cómo se verá afectada la disponibilidad de este recurso por cambio climático? Ésta es una pregunta que no puede responderse de manera inmediata, pero por medio de herramientas basadas en la modelación matemática pueden hacerse pronósticos de la situación de los recursos hídricos bajo los efectos del cambio climático; esto a su vez permitirá preparar las medidas necesarias de adaptación y o mitigación ante este fenómeno. De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés) no hay una tendencia en todo el mundo para la disminución o aumento de las precipitaciones, por lo que conviene la evaluación de éste efecto sobre los recursos hídricos.

La Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo (SUMA), manifiesta su interés y preocupación por el cambio climático, priorizándolo como un tema de política de Estado, estratégico y de seguridad estatal. Ha identificado la problemática que implica este fenómeno y la amenaza que significa en la disponibilidad de los recursos hídricos (SUMA, 2011).

El objetivo de este trabajo es evaluar cuantitativamente el impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan en el estado de Michoacán, haciendo uso de modelos de simulación hidrológica continua, y distribuida que permiten el procesamiento de distribuciones espacio-temporales de entradas, procesos, parámetros y resultados.

El cambio climático no se considera más como un problema que compete sólo a los países desarrollados. Por tanto, es tarea de países como México involucrarse en el estudio de éste y tratar de instrumentar a corto plazo aquellas acciones de política que permitan la mitigación del mismo; a mediano y largo plazo le corresponde crear estrategias y planes que le permitan adaptarse y mitigar el cambio climático en nuestro país. Para poder lograrlo es evidente que México necesita trabajar y desarrollarse en esta línea de investigación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Cambio Climático

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), define el cambio climático como: “El cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y, que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2001a).

El cambio climático es la variación estadísticamente significativa del clima con respecto al periodo histórico a una escala global o regional. Estos cambios se dan en los parámetros meteorológicos como la precipitación, temperatura, presión atmosférica, nubosidad, a diferentes escalas de tiempo. Teóricamente estas variaciones son producidas por causas naturales y antropogénicas (Martínez y Fernández, 2004).

Podemos definir al clima como un conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región, el cual está representado por el promedio del estado del tiempo incluyendo las variables superficiales de temperatura, precipitación o viento. Analíticamente, el clima es considerado como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante periodos de varias décadas. El clima es el promedio de muchos estados del tiempo en un lapso de meses, años o décadas. La constancia del tiempo puede determinar el tipo de clima en cierta área.

El tiempo y el clima están muy relacionados. El tiempo es determinista y el clima es probabilista. La inestabilidad de la naturaleza y actividad de los factores que componen y determinan el tiempo lo hacen difícil de predecir más allá de unos cuantos días; pero los cambios en el clima se pueden predecir a partir de diferentes estudios sobre los registros históricos de los estados del tiempo (Magaña, 2004).

Al conjunto de cambios que son naturales y que forman parte del funcionamiento del sistema climático se le conoce como variabilidad climática,

entonces ¿hasta dónde un evento es cambio climático y hasta cuando se considera como variabilidad climática?

El cambio climático como problema ambiental global se compone de una serie de transformaciones en el clima que no son naturales y que alteran a todos los componentes del sistema climático. Es importante diferenciar el término de cambio climático respecto de la variabilidad climática.

2.2 Gases efecto invernadero y el calentamiento global

El cambio climático es atribuido principalmente al alto índice de emisiones de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera, éstos son principalmente derivados del empleo de combustibles fósiles utilizados en las actividades humanas (carbón, petróleo, gasolinas y los combustibles derivados del petróleo), así como la tala inmoderada, incendios forestales y la contaminación del agua y el suelo. Sin embargo, no podemos atribuir el cambio climático únicamente a procesos empleados y actividades desarrolladas por el ser humano, también existen procesos de origen natural que pueden contribuir a la contaminación atmosférica y por ende a contribuir con el cambio climático.

Los Gases de Efecto Invernadero son aquellos que se establecen en la estratosfera, además de que absorben y emiten radiación en longitudes de onda en el espectro infrarrojo, entre las que está la radiación térmica. Clasificados en dos grandes grupos; los de origen natural, como es el vapor de agua (H_2O) principal gas de efecto invernadero, el bióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3), así como los de origen antropogénico; entre los que está nuevamente; el bióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), además de los producidos exclusivamente por el hombre, como son los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, los hidrofluorocarbonos (HFC), entre otros. (*Protocolo de Montreal <http://ozone.unep.org/spanish/>*).

El panel Intergubernamental del Cambio Climático, en sus diferentes reportes señala que el mundo se está calentando, que el clima está cambiando y que muchos de estos cambios están relacionados con los gases de efecto invernadero. Estos

cambios afectarán los escurrimientos en las cuencas y esto a su vez se verá reflejado en la disponibilidad de los recursos hídricos de cada región.

El crecimiento exponencial de la población en los dos últimos siglos y la búsqueda de la mejora en la calidad de vida del ser humano, han sido un gran impulso para el crecimiento tecnológico, lo que lleva implícito una sobre explotación de los recursos naturales del planeta y la aparición de agentes contaminantes que ocasionan un rompimiento en los procesos químicos que se dan en la atmósfera, alterando así su equilibrio y propiciando cambios climáticos a escala global.

Las conclusiones desde el Cuarto Reporte del Panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) incluyeron los argumentos más contundentes en cuanto a que el proceso de calentamiento es atribuible a las actividades humanas.

La manifestación más evidente del cambio climático es el calentamiento global, el cual se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales.

Existe ahora, con un 90% de confianza, evidencias de que el calentamiento global observado se desarrollando desde el siglo XX de manera inequívoca, y que éste está asociado a las acciones humanas, principalmente a la quema de combustibles fósiles y a procesos de cambio de uso de suelo (fundamentalmente a la deforestación). Por estos motivos, las concentraciones de dióxido de carbono aumentaron en un 35% desde la época preindustrial (1070) al año 2005, y, para el mismo periodo, las concentraciones del metano también aumentaron en un 148% y del óxido nitroso en un 18%. Estas alteraciones provocaron cambios en la composición atmosféricas que se han visto reflejados en un aumento en la temperatura global de 0.74 °C, y el aumento en el nivel medio del mar de 6 a 10 cm de 1961 a 2003, y el decrecimiento de la cubierta global de nieve y hielo, al grado que para el Ártico se reportó una pérdida de alrededor de 3.5 millones de kilómetros cuadrados en su superficie (IPCC, 2007).

Se podría pensar que 0.74°C es un aumento poco significativo como para preocupar a la humanidad. Lo cierto es que ese aumento en la temperatura es global, por lo que los aumentos regionales pueden rebasar con mucho ese valor; existen

regiones cercanas al Polo Norte cuyos aumentos de temperatura rebasan ya los 3.5 °C.

Para el caso de México, se han observado aumentos entre 1 y 2 °C para ese mismo periodo en el norte de nuestro país (IPCC-WGII, 2007).

2.3 Evidencias del cambio climático

Más de 557 estudios con más de 29 mil series de datos, la mayor parte de ellos europeos, por su mayor capacidad para desarrollar este tipo de estudios, muestran como los caudales en los ríos, principalmente en latitudes altas, se han visto reducidos en porcentajes importantes; lo que constituye un alto riesgo para la disponibilidad de agua (Delgado, *et. al.*, 2010).

Para el caso de América Latina algunos sectores y sistemas serían especialmente vulnerables. Es muy probable que los recursos hídricos se vean disminuidos entre un 10% y 30%.

De acuerdo al (IPCC) en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC, 2007), el futuro del planeta está en riesgo por el cambio climático a menos que se actúe en dos direcciones: la mitigación y la adaptación. La mitigación busca reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) e incrementar los sumideros de carbono, y con ello disminuir el calentamiento del planeta, es decir, reducir la amenaza. Por otro lado tenemos la adaptación, la cual busca desarrollar estrategias y acciones para reducir la vulnerabilidad al cambio climático de grupos sociales, regiones o sectores económicos por mencionar algunos, de forma tal que los impactos negativos esperados bajo cambio climático sean menores o eliminados, y se pueda incluso aprovechar las oportunidades asociadas a un nuevo clima. (Orlando, 2007).

Para que los tomadores de decisiones puedan decidir el rumbo a seguir, requieren de información científica, técnica y socioeconómica, objetiva y ampliamente aceptada sobre tomar una posición activa o pasiva frente al problema del cambio climático. Es necesario conocer sus repercusiones en varios ámbitos, así como

posibles operaciones de respuesta para poder evaluar los costos, los beneficios, y los riesgos.

Han sido en los últimos años donde se han registrado eventos que han sido atribuidos al cambio climático, por ello los impactos de un clima anómalo o extremo en diversos sectores de la actividad humana son lo que ha llevado a la sociedad, incluyendo a las instituciones de gobierno, a voltear sus ojos y preocuparse por el cambio climático.

Por otro lado sería interesante el considerar que no todos los desastres hidrometeorológicos ocurridos hasta ahora, han sido por efecto del cambio climático, y sobre todo la manera en esto pudiera demostrarse.

El sistema climático es altamente complejo (Gay 2003). Aún no se tienen y seguramente por mucho tiempo no se tendrán los modelos climáticos que simulen con absoluta precisión el comportamiento de la atmósfera, los océanos, los continentes, la biosfera y los cuerpos de hielo y nieve. Todos estos componentes y variables del sistema interaccionan entre sí a diferentes escalas espaciales y temporales, elevando con ello la complejidad del problema.

Aunado a esto existen áreas del conocimiento en los estudios climáticos de los que aún se sabe poco y de los que no se ha podido concluir si hay cambios significativos en ellos debido al calentamiento observado.

Se dice que el sistema climático es un sistema complejo y caótico (Pexioto y Ort, 1993), lo que no implica que no se pueda describir ni predecir su estado, más bien significa que al estado futuro de ese sistema complejo y caótico sólo lo podemos describir con probabilidades.

En cuanto al clima, se dice que el mejor pronóstico es el que se basa en el clima observado (Garduño, 1995; Gay, 2003). Para construirlo, requerimos varias decenas de años de datos del estado del tiempo, para poder saber, en promedio, cuál es el clima esperado en un cierto tiempo y lugar.

No existe una manera de hacer pronósticos exactos del clima. Las fuentes de incertidumbre no sólo provienen del aún limitado conocimiento que tenemos del

sistema climático, sino también provienen del hecho de que el cambio climático observado depende del uso que le demos en el futuro a los combustibles fósiles, a las tasas de deforestación, de las tendencias en cambio en el uso de suelo, además, y asociado a ello, del crecimiento poblacional, de los cambios en las economías globales y regionales, esto solo por citar algunos fenómenos sociales y económicos que determinarán la composición atmosférica futura.

Por esta razón, entre más alejado sea el tiempo para el que deseemos hacer proyecciones, la incertidumbre se vuelve más grande; los modelos climáticos con los que se cuentan comienzan a divergir en sus proyecciones aunque estén fundamentados en las mismas leyes de la física y la química atmosférica, esto se debe también a que la variabilidad climática es diferente temporal y espacialmente. El problema se agrava si lo que se quiere es saber del clima futuro en regiones o localidades reducidas.

A pesar de estas incertidumbres, es importante para el ser humano hacer proyecciones que den una idea del panorama que probablemente pudiera tenerse en años futuros. Entonces, para estudiar los posibles impactos futuros de un clima cambiante, así como las regiones y sectores más vulnerables a ese cambio, los científicos han construido lo que se denomina “escenarios climáticos” y los Modelos de Circulación General Acoplados al Océano (AOGCMs) o también conocidos como Modelos de Circulación General de la Atmósfera. (MCGs)

Mediante esos escenarios, los MCGs o modelos climáticos proyectan la variabilidad en la temperatura, en el nivel medio del mar, en las concentraciones de CO₂, entre otras variables.

Se considera entonces que el cambio climático es el problema ambiental más importante de este siglo y urge el diseño de estrategias para afrontarlo.

Las respuestas para combatir el cambio climático se denominan mitigación y adaptación. Son respuestas que implican la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación) y las medidas y estrategias necesarias para enfrentarlo (adaptación).

A nivel internacional se requiere que la llamada Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático logre finalmente los acuerdos y protocolos que comprometan a los países a reducir sus emisiones de gases efecto invernadero.

Difícilmente las soluciones se encontrarán en algunos avances tecnológicos, más bien, se tienen que ligar las acciones de mitigación y adaptación con tipos de desarrollo más sustentable y equitativo.

Diversos estudios prospectivos, a través del uso de modelos globales, señalan que México es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, con severos impactos en las poblaciones humanas y en los ecosistemas. Por ello, resulta esencial analizar causas y consecuencias de este proceso, que nos permitan construir estrategias de prevención, mitigación y adaptación, que disminuyan la vulnerabilidad y permitan enfrentar este proceso planetario en mejores condiciones (Delgado, *et.al.*, 2010).

En el cuarto informe del Grupo de Trabajo II del IPCC (Intergubernamental Panel Climate Change): Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. En la sección 3.2, hace hincapié en que la vulnerabilidad del clima está estrechamente relacionada con la variabilidad del clima y en particular con las precipitaciones. Existiendo vulnerabilidad en todas partes, como la infraestructura del agua (diques, tuberías, etc.) ya que estas han sido diseñadas para condiciones climáticas estacionales y la gestión de recursos hídricos empieza a tomar en cuenta las incertidumbres relacionadas con el cambio climático.

Mientras, las evaluaciones de escala mundial, consideran que una cuenca padece estrés hídrico 1, cuando su disponibilidad de agua por habitante es inferior a 1,000 m³/año (tomando como base el promedio histórico de la escorrentía) o cuando el cociente entre la extracción de agua y el promedio anual histórico de escorrentía es superior a 0.4. Un volumen de agua superior a 1,000 m³ por habitante y año es normalmente más de lo necesario para usos domésticos, industriales y agrícolas. Existen cuencas de ese tipo en el norte de África, región mediterránea, Oriente Medio y Próximo, sur de Asia, norte de China, Estados Unidos de América, México, noreste

de Brasil, y costa occidental de América del Sur (Figura 1). La población que vive en esas cuencas asciende a un total estimado de entre 1.4 y 2.1 billones de personas (Vörösmarty *et al.*, 2000; Alcamo *et al.*, 2003a, b; Oki *et al.*, 2003; Arnell, 2004).

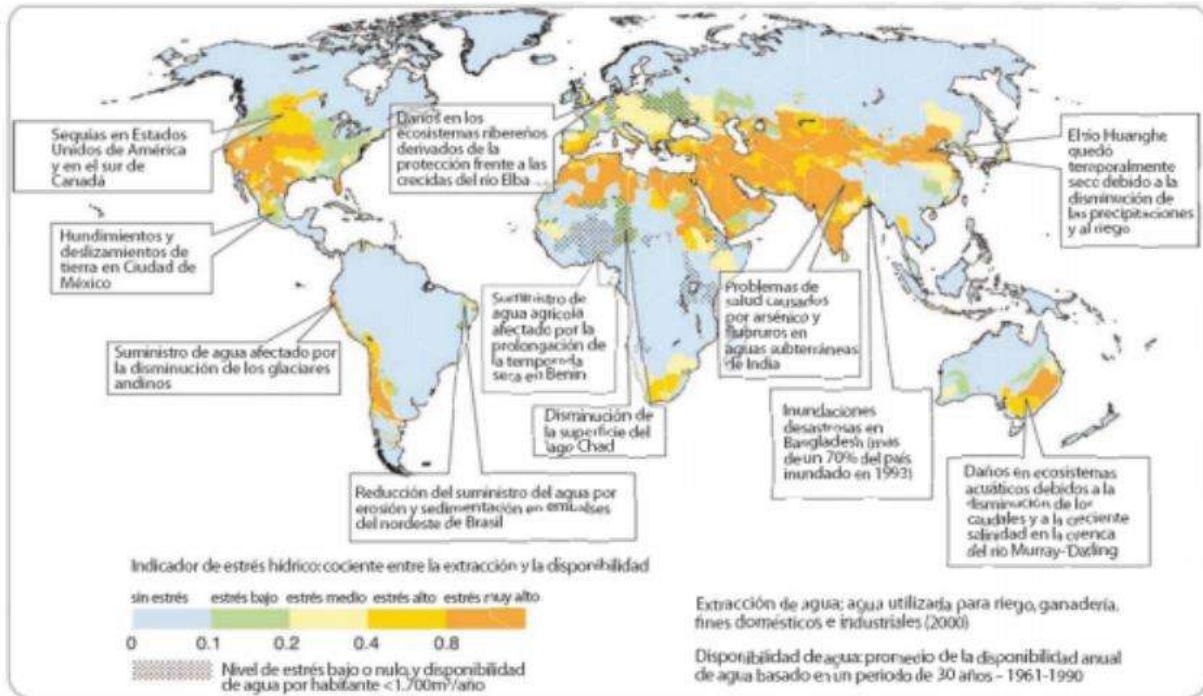


Figura 2.1 Vulnerabilidad actual de los recursos de agua dulce y de su gestión en el mundo. El estrés hídrico es un concepto que describe en qué medida está expuesta la población al riesgo de falta de agua.

Fuente: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch3s3-2.html

2.3.1 Eventos Meteorológicos extremos

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado. (IPCC, 2013)

Tanto sequías como inundaciones son eventos extremos comunes alrededor del mundo, mismos que parece se incrementarán en el futuro. De acuerdo con John Holmes, Subsecretario General y coordinador del fondo de emergencia de Naciones

Unidas, “cualquier visión creíble del futuro debe reconocer que las necesidades humanitarias están aumentando. El cambio climático será el principal agente. Nueve de cada diez desastres están ahora relacionados con el cambio climático. El número de desastres registrados anualmente se ha duplicado de 200 a más de 400 en las últimas dos décadas..., así que bienvenidos al nuevo escenario normal de clima extremo” (Holmes, 2008).

México es especialmente vulnerable por un conjunto de razones. Primero, su ubicación: el país cubre 17 grados de latitud (de 32 grados norte a 15 grados sur), y esto incluye una amplia variedad de subclimas, así como una mayor probabilidad de ser tocado por huracanes, ciclones y tormentas de viento, con frecuencia seguidos de inundaciones. Temperaturas extremas son comunes también en esa zona, como es la actividad sísmica, especialmente en la región centro-occidental. Esta situación se agrava por los altos niveles de pobreza en México (50 a 60% de la población, dependiendo de la fuente), y su sesgada distribución del ingreso.

La tabla 2. 1, muestra un concentrado de los eventos meteorológicos extremos más recientes en México. Este tipo de eventos traen consecuencias graves tanto en la pérdida de vidas humanas, como pérdidas económicas graves.

Tabla 2.1 *Eventos climáticos extremos recientes en México (1988-2010).*

Evento	Año	Costo estimado (millones de dólares)
Deslave e inundaciones en Michoacán	2010	900
Inundaciones en Tabasco	2007	700
Huracán Wilma	2005	1752
Huracán Emily	2005	302
Huracán Stan	2005	228
Huracán Isidore	2002	308
Huracán Kenna	2002	176
Huracan Juliette	2001	90
Huracán Pauline	1997	62
Huracán Gilbert	1988	567

Fuente: CENAPRED, CONAGUA, varios años.

2.4 Escenarios de emisiones de gases efecto invernadero (o GEI)

Los modelos climáticos permiten realizar proyecciones del cambio climático relacionado con la creciente acumulación en la atmósfera de GEI, y son la única herramienta de que se dispone para derivar objetivamente las futuras alteraciones del clima que podrían causar las emisiones antropogénicas de estos. El rango y la probabilidad asociada con las tendencias climáticas es mejor entendido si se ejecutan múltiples experimentos, con diferentes modelos climáticos, considerando distintos escenarios GEI.

Los GEI fueron definidos por el Informe Especial sobre Escenarios de Emisión (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) del IPCC (IPCC SRES, 2000), establecidos por forzamientos tales como el desarrollo demográfico, socioeconómico y tecnológico. La evolución futura es altamente incierta, y ninguno de ellos es considerado, por ahora, más probable de ocurrir.

Los modelos climáticos y las representaciones del clima se utilizan para determinar cuándo un sector específico es potencialmente vulnerable al cambio climático, o para identificar los límites, en que los impactos se hacen negativos o severos. A tales representaciones del clima futuro se les ha denominado escenarios de cambio climático y pueden definirse como *una* representación del clima futuro que es internamente consistente, que ha sido construida empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser utilizada para comprender las respuestas de los sistemas medio ambientales y sociales ante el futuro cambio climático.

De acuerdo a Hernández (2007), con los Modelos Generales de Circulación de la Atmósfera se crean diferentes escenarios de cambio climático, los cuales se definen como 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 que se pueden presentar en el futuro en las diferentes variables como temperatura, precipitación, población mundial, emisiones de CO₂, nivel medio del mar entre otros. La mayoría de los escenarios son construidos en base a la evolución de las tendencias climáticas pasadas.

Los escenarios que con mayor frecuencia han sido utilizados en los trabajos de investigación, son los desarrollados por el Panel Intergubernamental de Expertos del cambio climático (IPCC, 2000), cuya descripción se enuncia a continuación:

- Escenarios de emisión del IPCC.
- Escenarios IS92 del IPCC (1992).
- Escenarios SRES/IE-EE del IPCC (completos y actuales). De acuerdo con el IPCC (2001) y (2007) Los escenarios presentan cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2) y para cada línea evolutiva, se han desarrollado varios escenarios distintos basados en diferentes evoluciones de las diferentes variables que intervienen en el cambio climático.
 - Escenarios socioeconómicos
 - Escenarios de cambio de uso en la tierra.
 - Escenarios de incremento de población
 - Escenarios ambientales (temperatura y precipitación).
 - Escenarios de incremento en el nivel del mar.

Las cuatro líneas evolutivas cualitativas proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados “familias”: A1, A2, B1 y B2. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A1, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía: A1FI (utilización intensiva de combustibles de origen fósil), A1B (equilibrado) y A1T (predominantemente con combustibles no de origen fósil).

Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final. Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados.

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

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

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

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y

medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional. (Informe Especial IPCC, 2000).

“La creación de los escenarios de cambio climático, es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático, pues de ellos depende la dirección de los impactos estimada. Los escenarios regionales constituyen puentes entre los encargados de los GCMs y los responsables de construir estrategias de adaptación. Por ello, los escenarios de cambio climático deben brindar información relevante para los sectores o a la medida de las necesidades del usuario, suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto” (Orlando, 2010).

Los escenarios son una forma de pensar en el futuro. El objetivo de los escenarios es ayudar a sus usuarios a prepararse para enfrentar las condiciones a la que pudiéramos llegar a enfrentar de acuerdo con las tendencias mundiales.

Actualmente para México han sido desarrollados nuevos escenarios de cambio climático, como resultado de los productos del quinto informe del panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014), los cuales son actualmente utilizados para desarrollar los nuevos trabajos de investigación referentes a este tema.

2.4.1 Escenarios RCP de emisiones a la atmósfera

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van de modelos climáticos sencillos a otros integrales, pasando por modelos de complejidad intermedia, así como modelos del sistema Tierra. Esos modelos simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha

utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las trayectorias de concentración representativas (RCP). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas en 2100 respecto de hoy en día, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI.

A fin de elaborar las proyecciones del cambio climático en el Grupo de trabajo I del IPCC, se precisa información sobre las futuras emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros impulsores del cambio climático. Esa información generalmente se expresa como un escenario de actividades humanas, las cuales no se evalúan en el presente informe. Los escenarios utilizados en el Grupo de trabajo I se han centrado en las emisiones antropógenas y no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales, por ejemplo, de CH₄ y N₂O. Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés, véase el glosario), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, esto es, 2.6 W/m², en el caso del escenario RCP 2.6; 4.5 W/m², en el caso del escenario RCP 4.5; 6.0 W/m², en el caso del escenario RCP 6.0, y 8.5 W/m², en el caso del escenario RCP 8.5. En relación con los resultados de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) (Programa Mundial de Investigaciones Climáticas), los valores indicados deben entenderse únicamente a título indicativo, ya que el forzamiento climático resultante de todos los impulsores varía entre los distintos modelos, debido a las características propias del modelo y al modo específico en que se consideran los elementos de forzamiento climático de corta vida.

Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6); dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE), que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de

Evaluación. En los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5, en 2100 el forzamiento radiativo no llegará a su máximo; en el RCP 2.6, llega al máximo y disminuye; y en el RCP 4.5 está estabilizado. Los cuatro escenarios ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, y especifican cuáles serán las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones antropógenas anuales hasta 2100.

Los escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono. Si bien los escenarios de RCP abarcan una amplia gama de valores de forzamiento total, en ellos no se considera todo el abanico de emisiones definidos en la bibliografía, especialmente los aerosoles.

La mayoría de las simulaciones de la CMIP5 y de los modelos del sistema Tierra se han llevado a cabo con concentraciones definidas de CO₂ que, en el año 2100, alcanzarán 421 ppm (RCP 2.6), 538 ppm (RCP 4.5), 670 ppm (RCP 6.0) y 936 ppm (RCP 8.5). Teniendo también en cuenta las concentraciones definidas de CH₄ y N₂O, las concentraciones de CO₂ equivalente combinadas corresponden a 475 ppm (RCP 2.6), 630 ppm (RCP 4.5), 800 ppm (RCP 6.0) y 1 313 ppm (RCP 8.5). Por lo que respecta al escenario RCP 8.5, se han llevado a cabo simulaciones adicionales, integrando la CMIP5 y modelos del sistema Tierra con las emisiones definidas de CO₂ proporcionadas por los modelos de evaluación integrados. Para todos los escenarios de RCP, se han realizado cálculos adicionales con datos y modelos actualizados de la química de la atmósfera (en particular de la química de la atmósfera y el componente climático de la CMIP5), utilizando las emisiones definidas para los escenarios de RCP de los gases químicamente reactivos (CH₄, N₂O, HFC, NO_x, CO, COVNM). Esas simulaciones permiten llevar a cabo investigaciones de incertidumbres en relación con las retroalimentaciones del ciclo del carbono y con la química de la atmósfera. (IPCC, 2013).

Recientemente México desarrolla escenarios climáticos regionales a través del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias

de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Bajo un estudio denominado “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En dicho estudio se realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México, que serán utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de cambio Climático (IPCC).

La abreviación RCP de los nuevos escenarios significa: Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por siglas en inglés). Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, que se refieren a la radiación global de energía expresada en W/m^2 . Sus características se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Escenarios RCP. (Moss, et al., 2010)

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	>8.5 W/m^2 en 2100	>1,370 CO_2	Aumentando	MESSAGE (Austria)
RCP 6.0	6 W/m^2 estable después de 2100	850 CO_2 estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	4.5 W/m^2 estable después de 2100	650 CO_2 estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en 3 W/m^2 antes de 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO_2 antes de 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países bajos)

REFERENCIA: Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban y M. E. Bravo, 2013: ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN NACIONAL . Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

2.5 Modelos de Circulación General (o MGC)

La herramienta que se tiene para analizar los impactos en el clima en un futuro en el planeta son los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG). Éstos son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera, son entonces, modelos matemáticos que dividen a la atmósfera en capas, cada capa en una cuadrícula; generando así una retícula de celdas en tres dimensiones. Con datos de temperatura y presión, entre otras variables, en cada una de estas celdas se estima cómo varían estos parámetros en el tiempo según las condiciones generales los valores de las celdas vecinas.

Para utilizar un MCG se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes.

Para poder conocer cómo se comportará el clima en el futuro, estos modelos incluyen variables como uso y tipo de suelo de la zona en estudio, su topografía, localización de cuerpos de agua, considerar la temperatura superficial y del océano, además de la nubosidad y salinidad. Hoy en días se dispone de modelos tan complejos y completos que no solamente consideran las características atmosféricas, sino también la dinámica de los océanos, de la biosfera y la criósfera (casquetes de hielo y nieve).

Los modelos, son capaces de procesar cascadas de datos que proceden de una red de estaciones, satélites y estaciones de control remoto cada vez más amplia para entregar pronósticos del tiempo precisos, aunque no exactos.

Los Modelos Climáticos Globales (GCM) tienen capacidades para simular la distribución sinóptica de las principales variables climáticas y aspectos del cambio climático observado. Pero presentan deficiencias a escalas regionales debido a su gruesa resolución espacial (generalmente del orden de cientos de kilómetros). A pesar de que la capacidad computacional se ha incrementado, los GCM no simulan

adecuadamente características climáticas de mesoescala. Además, algunas veces estos modelos simplifican o parametrizan inadecuadamente procesos climáticos no lineales complejos. Estas desventajas, que se atribuyen principalmente a la baja resolución espacial, se han intentado superar mediante la construcción de Modelos Climáticos Regionales (RCM por sus siglas en inglés) con resoluciones más finas, anidados en los GCMs. De esta manera, los GCMs imponen las condiciones de frontera (o contorno) a los RCMs.

La resolución espacial típica de los MCG es de 300 km x 300 km, esta característica no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo, ciclo hidrológico). En ocasiones, 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 tales motivos es necesaria la reducción de escala espacial de salidas de MCG en donde se incorporan elementos que resultan en circulaciones de mesoescala y/o clima local en las proyecciones de cambios atmosféricos, sumando así un valor agregado a las salidas directas de los MCG. Es claro que mucho de ese valor agregado, dependerá del entendimiento de los procesos que generan clima local o regional y de la disponibilidad de datos para poderlo representar (Orlando, 2010).

Los RCMs son herramientas muy útiles para entender la dinámica del clima y realizar estudios de impactos a escala de cuenca. Los RCMs corresponden a una reducción de escala (“downscaling”) de GCMs, práctica común para obtener información de alta resolución acerca de los escenarios de cambio climático proyectado. Las técnicas de downscaling pueden considerarse estadísticas o dinámicas.

Los MCG por ser globales tienen una menor resolución por lo cual no son muy indicativos para estudios e investigaciones de zonas específicas, en este sentido es necesario el uso de un modelo regional el cual puede tomar mayores resoluciones y ser más correctos en la determinación del clima de una zona en específico.

El regionalizar las salidas de un GCM no es sólo un proceso de interpolación, sino que requiere de saber qué se gana y qué se pierde cuando se presentan versiones de alta resolución espacial de un GCM. Por ello, uno de los grandes retos en el estudio del cambio climático a través de modelos es analizar fenómenos de mesoescala que tienen un fuerte impacto en parámetros meteorológicos y en cantidades derivadas, como es la disponibilidad de agua o los rendimientos agrícolas.

La base de la reducción de escala estadística es que existen relaciones entre el clima local y el de gran escala (dinámicas o estadísticas), que permiten determinar condiciones locales a partir de información de baja resolución, y que estas relaciones permanecen válidas aún bajo condiciones climáticas futuras. Las técnicas estadísticas de reducción de escala se refieren a métodos en los que los cambios regionales o locales, correspondientes a procesos de menor tamaño que la resolución espacial del MCG, son calculados como función del clima de gran escala.

Los escenarios de cambio climático regional, según lo marca (Orlando, 2010) se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (proceso denominado como downscaling) estadísticas o dinámicas.

- En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general.
- Las técnicas dinámicas son los Modelos de Clima Regional. Estos modelos son similares a los modelos de clima global pero de mayor resolución espacial y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos dentro del dominio de interés.

El esquema CPT permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR) así como diferentes análisis de correlación, estandarizar los campos de los MCG muestrear los datos, re-calibrar las ecuaciones, normalizar los campos, sustituir valores faltantes, entre otros (Magaña y Caetano, 2007).

No resulta fácil establecer cuál es el mejor o peor modelo para cambio climático por lo que la estrategia a seguir, dada la naturaleza caótica del sistema climático, es trabajar por medio de ensambles multimodelo. (Magaña y Caetano, 2007).

Los Modelos de Circulación General Acoplados son programas de cómputo que reproducen la dinámica atmosférica en diferentes escalas incluyendo los efectos del océano y los continentes. Son herramientas versátiles y de suma utilidad que incluyen un complejo grupo de procesos, basados en leyes físicas. Con estas herramientas se realizan simulaciones bajo diferentes condiciones radiativas, incluidas las de cambio climático mediante escenarios, como RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, con las cuales se generan proyecciones a futuro.

Los datos disponibles para México son generados a través de simulaciones de 15 MCG del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), (ver tabla 2.3). Los cuales se recortaron a una malla de 0 a 40°N, y de 140W a 60W y se interpolaron en los puntos de malla de las observaciones (CRU), de 0.5° * 0.5°. Las variables en superficie utilizadas son Precipitación, Temperatura Máxima, Mínima y Promedio.

A través de los Modelos de Circulación General y los escenarios de cambio climático, es posible obtener los datos de precipitaciones y temperaturas para un sitio en particular, siempre y cuando la resolución de los modelos lo permita.

México ha trabajado fuertemente en el desarrollo de estos nuevos escenarios que son lo que se utilizan actualmente. La base de datos utilizada es la llamada CRU versión TS3.1.

Tabla 2.3 Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG). Enlista los 15 MCG que fueron utilizados por el INECC para general el nuevo modelo ensamble de donde provienen las series de precipitaciones y temperaturas utilizadas en las modelaciones de cambio climático.

Modelos de Circulación General (MCG)		
1.-Max Plank Institute (MPI-ESM-LR)	6.-Beijing Climate Center (BCC-CSM1-1)	12.-Met Office Hadley (MOHC)
2.-Institute for Numerical Mathematics (INM)	7.-Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-cm5a-Ir)	13.-Meteorological Research Institute (MRI-CGCM3)
3.-Norwegian Climate Center (NorESM1)	8.-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R)	14.-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-CM3)
4.-Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CanESM2)	9 y 10.-Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC-esm-chem y MIROC-esm)	15.-Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO-MK3-6)
5.-Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5)	11.-Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC5)	

REFERENCIA: Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatz, O. Santiesteban y M. E. Bravo, 2013: ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN NACIONAL . Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

La base de datos utilizada es generada por la unidad de Investigación Climática (CRU por sus siglas en inglés), que es parte de la Escuela de Ciencias Ambientales en la Universidad del Anglia Oriental, Inglaterra (UEA, por sus siglas en inglés). CRU es ampliamente reconocida como una de las instituciones líder dedicadas al estudio del cambio climático natural y antropogénico, cuyo principal objetivo es mejorar el entendimiento científico en tres áreas considerando tanto la historia del clima pasado y su impacto en la humanidad, el curso y las causas del cambio climático durante este siglo y los cambios esperados en el futuro.

Los datos de CRU utilizados provienen de la versión TS 3.1, tienen una resolución temporal mensual para el periodo de 1901-2009 y resolución espacial de 0.5°x0.5° para todo el mundo. Para este estudio se recortó a la región 0° a 40°N, y de 140°W a 60°W (figura 1) para las variables temperatura media, mínima, máxima, precipitación. Esta base de datos se generó a partir de estaciones meteorológicas

distribuidas en todo el mundo, más de 8000 para la temperatura y de 6000 para precipitación. Por ello CRU tiene datos solo sobre continente. Las fuentes potenciales de no homogeneidades en las estaciones climáticas y métodos de corrección fueron utilizando el método de Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN) de Peterson *et al.*, (1998a).

La generación de las series de datos de precipitación y temperaturas proyectadas a años futuros, considerando los efectos del cambio climático, son generados, como ya se había venido mencionando a partir de los MCG, los cuales son desarrollados en distintas partes del mundo con variables distintas. El ensamble de dichos modelos se hace a través del método de Fiabilidad de Ensamble ponderado (REA).

El método de ensamble ponderado fue propuesto y desarrollado por Giorgi y Mearns (2001) con el objetivo de dar mayor peso a los MCG que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con las variables observadas en un punto de malla dado.

El ensamble ponderado REA se calculó para las proyecciones de cambio y las simulaciones históricas de los 15 MCG empleados, por puntos de malla, mediante la ecuación 1; por ejemplo para la anomalía de temperatura (ΔT):

$$\overline{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad (1)$$

Donde R_i es el peso de cada modelo (i) por punto de malla, definido por el producto de dos criterios: el de tendencia ($R_{B,i}$) y el de convergencia ($R_{D,i}$), donde los parámetros m y n pueden ser usados para darle más peso a un criterio que a otro:

$$R_i = \left[(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{1/(m+n)} \quad (2)$$

El criterio de tendencia se refiere a qué tan diferente es el modelo “i” respecto a los datos observados, en el periodo 1961-2000. Por lo tanto entre menor sea la diferencia de las dos bases de datos, mayor es la confiabilidad de tal modelo. Para lo cual se requiere tener datos históricos de los modelos a utilizar. Este factor se da por la ecuación:

$$R_{B,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|B_i|} \right]^m \quad (3)$$

El criterio de convergencia es la distancia del modelo “i” respecto al resto de los modelos, es decir, del promedio REA. Este criterio es un método iterativo, en el que, en la primera iteración se toma en cuenta el promedio simple para calcular la distancia $[Di1]= [\Delta Ti-(\Delta Ti)]$, la cual se usa en las ecuaciones 1 y 2.

Con lo anterior se recalcula la distancia de cada modelo (iteración 2) con el promedio REA $[Di2]= [\Delta Ti-(\Delta Ti)]$, y así sucesivamente. El proceso iterativo se termina cuando se alcanza el criterio de convergencia (que en este caso se consideró cuando $[Din-Din-1] \leq 0.01$). Entre menor sea la distancia del modelo “i” mayor será el valor de éste criterio.

$$R_{D,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|D_i|} \right]^n \quad (4)$$

En las ecuaciones 3 y 4 aparece el parámetro ε , el cual es una medida de la variabilidad natural. Para calcular esta variabilidad se eliminó la tendencia del periodo 1961-2000 y se calculó el promedio móvil de 30 años. Finalmente ε se definió como la diferencia entre los valores máximos y mínimos de este promedio. Para estimar el rango (delta) de incertidumbre del ensamble promedio del REA, se

calculó la raíz cuadrática media de la diferencia de los cambios utilizando los resultados de las ecuaciones 1 (anomalía) y 2 (peso):

$$\bar{\delta}_{\Delta T} = \left[\frac{\sum_i R_i (\Delta T_i - \bar{\Delta T})^2}{\sum_i R_i} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Por lo tanto los límites superior e inferior de la incertidumbre están definidos por:

$$\begin{aligned} \Delta T_+ &= \bar{\Delta T} + \delta_{\Delta T} \\ \Delta T_- &= \bar{\Delta T} - \delta_{\Delta T} \end{aligned} \quad (6)$$

2.6 Modelos Matemáticos.

Dentro del campo de la hidrología, el uso de la modelación se ha vuelto una herramienta indispensable. Con la modelación de los sistemas hidrológicos se busca su identificación y cuantificación. La modelación matemática permite, con un cierto grado de aproximación, analizar el funcionamiento de los sistemas y mejorar la visión de los mismos, a partir de las situaciones hipotéticas que se pueden generar.

La evaluación del recurso agua es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de los recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar este recurso: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escorrentía. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias

Los modelos matemáticos se clasifican en diferentes categorías; según la información de entrada, según el tipo de representación, según la aplicación y según la aleatoriedad.

Según la información de entrada se clasifican en:

- Empíricos.- Utilizan información de observaciones o de experimentos.
- Heurísticos.- Se basan en explicaciones del fenómeno en estudio.

Según el tipo de representación se clasifican en:

- Cualitativos o Conceptuales.- Usan figuras, gráficos o descripciones esquemáticas.
- Cuantitativos o Numéricos.- Utilizan números y algoritmos matemáticos.

Según la aplicación se dividen en:

- Modelos de Simulación.- Predice que sucederá en una situación específica.
- Modelos de Optimización.- Determinan como resolver problemáticas administrativas o de producción.

Según la aleatoriedad de los modelos, éstos se dividen en dos grandes grupos; los determinísticos y los estocásticos. En los modelos determinísticos, las variables son determinadas mediante leyes de la física, las cuales se pueden considerar como exactas; por otro lado, en los modelos estocásticos, las variables se determinan por las leyes del azar, por lo que son modelos caracterizados en términos de probabilidad.

2.6.1 Modelos de simulación hidrológica

Los modelos de simulación matemática son cada vez más empleados al reproducir los procesos naturales y los efectos que producen las actividades humanas en los mismos, como por ejemplo el ciclo hidrológico y, los fenómenos físico-químicos y biológicos asociados. Estos modelos han sido utilizados ampliamente para la simulación de procesos naturales en los que las actividades antropogénicas contribuyen con las afectaciones.

La utilización de los modelos de simulación, cada vez más complejos y con mayor cantidad de procesos, obliga al análisis pormenorizado de los fenómenos naturales y de las actividades humanas, aclarando y aportando luz sobre cómo se ha llegado a la situación actual en la que se encuentran las masas de agua y, permitiendo

de esta forma, evaluar las tendencias futuras y los efectos que producirán alteraciones en las actuales actividades humanas.

En la actualidad, los modelos de simulación hidrológica son la mejor herramienta con que se cuenta para el análisis de cuencas hidrográficas y para la gestión de los recursos hídricos en las mismas; incluyendo las aguas superficiales y las aguas subterráneas, ya sea desde el punto cuantitativo, como cualitativo (físicoquímico, biológico, ecológico, etc.), y de los fenómenos extremos que suceden en la naturaleza como inundaciones y sequías.

Prueba de la necesidad de los modelos hidrológicos, es la evolución de los mismos en todo el mundo.

La evolución histórica que han presentado los modelos de simulación, es una prueba de que su uso se ha vuelto una herramienta fundamental e importante a nivel mundial.

Los primeros modelos de simulación matemática surgieron entre los inicios y la mitad del siglo XX, y permitieron simular de forma sencilla (agregada por cuenca hidrográfica) las componentes fundamentales del ciclo hidrológico y con ello se mejoró el conocimiento y entendimiento del mismo.

Con el paso de los años, los primeros modelos de simulación hidrológica han ido incorporando nuevas componentes que proporcionan un mayor grado de detalle, de manera que a finales del siglo XX ya se había logrado conocer todas las componentes del ciclo hidrológico.

Existe una gran cantidad de modelos de simulación del ciclo hidrológico, de la gestión de cuencas, de las componentes químicas del agua y, de los efectos sobre el resto de los elementos naturales o antrópicos, que responden a diferentes formas de abordar el análisis del ciclo hidrológico y sus interrelaciones, a lo largo de la historia y en la actualidad. Esta diversidad se debe a la gran variabilidad que existe entre los problemas de unas cuencas hidrográficas y otras, a los problemas que se plantean en unas sociedades y otras, y también a los importantes cambios tecnológicos experimentados durante este tiempo. En ocasiones, un modelo que cubre perfectamente las necesidades de un lugar en concreto no cubre las necesidades de

otro, por lo que se hace necesario introducir cambios en el mismo (lo que a veces no es posible) y, genera el desarrollo de nuevos modelos. Además, la evolución tecnológica y, concretamente la mayor capacidad computacional, hace que se recuperen muchos años después formulaciones o métodos matemáticos abandonados por la dificultad de aplicación o de cálculo.

A todos estos factores se suma la irrupción a finales del siglo XX de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la forma que tienen los mismos de trabajar con grandes volúmenes de información. Estos sistemas han permitido considerar en su totalidad la variabilidad espacial de los factores que afectan al ciclo hidrológico (precipitación, temperatura, uso de suelo, topografía, etc.), por lo que se han constituido en las mejores plataformas para realizar estos análisis a gran escala.

Como consecuencia de todos estos factores existe, en la actualidad, una cantidad difícilmente numerable de modelos de simulación del ciclo hidrológico y del resto de las variables relacionadas con él. En el futuro los modelos aumentarán, así como los procesos que en ellos se simulen, lo que generará una base científica importante que permitirá, gracias a la facilidad en el intercambio de información, mejorar de forma significativa el conocimiento de los fenómenos naturales y las interdependencias con las actividades humanas.

Existen diferentes clasificaciones de los modelos de simulación y de evaluación de recursos hídricos utilizados en la actualidad, según sean las características que se analicen (Estrela, 1992).

Determinísticos

- Lineales
- No lineales
- Conceptuales
- Caja negra
- Respecto al espacio (de parámetros concentrados o distribuidos)
- Respecto al tiempo (de modelación por eventos o continua)

Estadísticos o estocásticos

- Generación de series de tiempo
- Regresión
- Probabilísticos

Modelos de Optimización

- Programación lineal
- Programación dinámica

A su vez, los modelos hidrológicos determinísticos pueden ser distribuidos o agregados. Y los estocásticos podemos clasificarlos en autorregresivos o de correlación múltiple.

De acuerdo al proceso, podemos clasificarlos en:

- Modelos lluvia-escorrentamiento
- Síntesis hidrológica

Los modelos lluvia-escorrentamiento pueden ser de balance hídrico continuo, o bien de simulación de sucesos. Algunos de ellos han sido incorporados a Sistemas de Información Geográfica con la firme intención de facilitar su uso y su aplicación.

Los modelos a emplear para este trabajo de investigación son del tipo lluvia-escorrentamiento, por lo que a continuación se presenta una breve definición y ejemplos de programas que trabajan algunos de estos modelos.

- *CEQUEAU* (INRA-ETE). Modelo desarrollado por el Institut National de la Recherche Scientifique, Eau, Terre et Environnement, es del tipo distribuido. Modelo de lluvia-escorrentamiento que trabaja a partir de información fisiográfica. Su mayor desventaja es que requiere de muchas horas hombre. El dimensionamiento del mallado de trabajo va desde 10 por 10 kilómetros hasta 100 por 100 metros.

- *EVALHID* (Andreu, 2001). Es un modelo del tipo lluvia-escorrentamiento, con funcionalidad para cuencas complejas. Tiene el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las cuencas. Se ha implementado sobre el Sistema Soporte Decisión (SSD) *AQUATOOL* (Andreu *et al.*, 1996) y en su nueva versión *AquaToolDMA* (Solera *et al.*, 2007).
- *SIMPA* (Simulación Precipitación-Aportación). Es un modelo hidrológico distribuido utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural. Fue desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), durante la elaboración del Libro Blanco del Agua en España.

Lleva a cabo una modelación distribuida de los componentes básicos del ciclo hidrológico con periodo temporal mensual y a la escala global de todo el territorio nacional. Se simula el proceso de generación de la escorrentía a partir de información meteorológica y de las características de las cuencas, permitiendo estimar los caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca.

- *ABCD* (Salas, 2002). Es un modelo conceptual precipitación escorrentía, basado en el balance de agua de una cuenca. El modelo utiliza la precipitación como dato de ingreso y todas las demás variables son calculadas como porcentajes de la precipitación. Presenta características de modelo agrupado (no distribuido espacialmente). Por la simplicidad de sus ecuaciones y poco requerimiento de información, este modelo es usualmente utilizado con fines académicos, lo cual no le quita validez y puede utilizarse para estudiar cuencas pequeñas (Salas *et al.*, 1981).
- *PATRICAL* (Pérez, 2005). El módulo *PATRICAL* (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) permite construir modelos espacialmente distribuidos del ciclo hidrológico, obteniendo los flujos de agua

que se producen en los diferentes puntos de la cuenca y los niveles piezométricos medios en los acuíferos. Además, incluye la simulación del contenido de nitrato y de la conductividad eléctrica del agua en el suelo, en el medio no saturado, en los acuíferos y en las aguas superficiales.

2.6.2 Modelo hidrológico de Témez

Dentro de la gama de modelos lluvia-escorrentamiento con que se cuenta actualmente, uno de los modelos seleccionados para este trabajo de investigación es el modelo de Témez, más adelante se abordará también el modelo HBV utilizado también en esta investigación.

El modelo de Témez (Témez, 1977; Estrela y Quintas, 1996; Ruiz, 1999; Cabezas *et al.*, 1999; Álvarez *et al.*, 2005), es un modelo hidrológico de simulación continua, conceptual, que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica.

El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar en un sistema hidrológico desde el instante en que comienza a llover hasta el momento en que se genera escorrentía y la posterior descarga de los acuíferos a los ríos.

Para ello reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico, plantea el principio de continuidad y establece, a escala mensual, leyes de reparto y transferencias de agua entre los distintos almacenamientos.

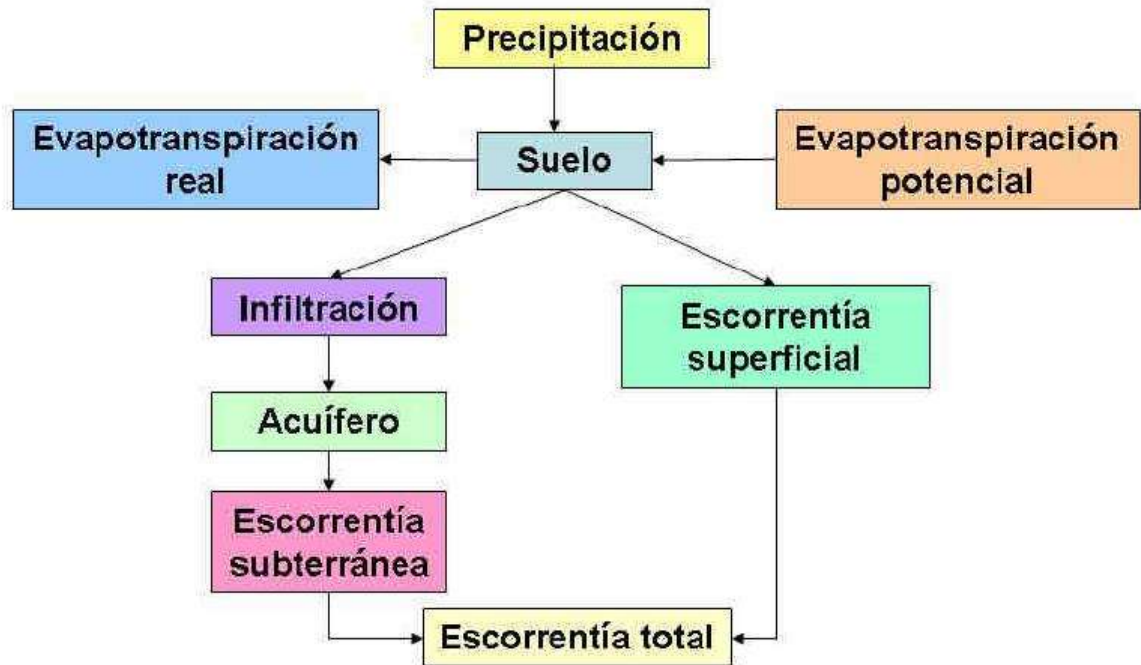


Figura 2.2 Esquema del modelo de Témez

Las entradas al modelo corresponden a datos de precipitación y evapotranspiración potencial. Otra información que precisa el modelo son datos sobre topología y clasificación de las subcuencas consideradas (Quintas, 1996), así como los mapas de unidades hidrogeológicas.

El modelo de Témez se encuentra en el rango intermedio dentro de los de su clase, es decir por encima de él se encuentran otros más complejos pero que presentan dificultades al momento de aplicarlos por la información de entrada que requiere; por debajo de éste se encuentran otros modelos que son mucho más sencillos pero que los resultados suelen ser de menor calidad. El modelo de Témez ha sido ampliamente utilizado y probado en otros países, obteniendo resultados favorables y confiables; siendo éstas las razones de mayor peso en la selección del modelo a emplear.

Témez es un modelo agregado de simulación de cuencas del tipo lluvia-escorrimento. Este modelo no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, los cuales se sustituyen por valores medios.

Debido a esta simplificación, el modelo de Témex se utiliza solo para cuencas pequeñas e intermedias cuando éstas tienen cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica, para cuencas de gran tamaño es necesario realizar divisiones en cuencas más pequeñas, funcionando así como un modelo semiagregado.

Es un modelo de pocos parámetros y el balance de humedad está constituido por el flujo de entrada (precipitación), el cual se reparte en flujos salientes, intermedios y de almacenamiento intermedio.

Los componentes de este modelo son los siguientes:

- Flujos de entrada: la precipitación (P).
- Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (A_{sup}), y la aportación de origen subterráneo (A_{sub}).
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes " t " (R_t).
- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (H_t) y, el volumen almacenado en el acuífero (V_t).

En este modelo se considera que la precipitación (P) se distribuye de tres maneras distintas, como se describe a continuación:

- El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (I_t) y, en un flujo que escurre superficialmente (A_{sup}). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A_{subt}) y la otra parte permanece en dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.
- La evapotranspiración real (E_t) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H_t).

- La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del suelo (H_{max}).

Para el cálculo del excedente (T) las expresiones matemáticas que se utilizan son:

$$T_t = 0 \quad \text{si } P_t \leq P_0 \quad (7)$$

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t + \delta_t - 2P_0} \quad \text{si } P_t > P_0 \quad (8)$$

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + EPT_t \quad (9)$$

$$P_0 = C (H_{max} - H_{i-1}) \quad (10)$$

Donde:

- $H_{m\acute{a}x}$ es la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de la cubierta, pendiente del terreno y espesor de la franja de suelo donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de H_{max} aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención superficial de agua (poca pendiente, presencia de vegetación o cultivos en surcos).
- H_{t-1} es el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante t-1.
- EPT_t la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t. Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.
- C es el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que toma valores en torno a 0.30 (Témez, 1977) y permite obtener el valor umbral de precipitación P_0 a partir del déficit de humedad del suelo ($H_{max} - H_{t-1}$).

De las ecuaciones anteriores podemos observar que cuando la precipitación mensual (P_t) es menor al umbral de precipitación (P_{0t}), toda la lluvia es almacenada como humedad en el suelo.

También se puede observar que cuando sea menor la humedad antecedente, es decir; del mes anterior, el umbral de precipitación (P_{0t}) será mayor.

Una vez que se tiene determinado el excedente (T_t), la humedad del suelo al final de cada mes se obtiene con la siguiente expresión:

$$H_t = H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \quad (11)$$

La humedad final en el suelo para el mes a evaluar es igual a la humedad existente en el mes "t-1" más la precipitación del mes "t" y menos el excedente calculado anteriormente. A esto se le resta la evapotranspiración potencial del mes "t". Si el valor obtenido es negativo, se toma el cero como resultado, ya que esto implica que la evapotranspiración potencial no se ha desarrollado en su totalidad y por tanto la humedad del suelo al final del mes "t" es nula.

Para obtener la evapotranspiración real que se produce (ET_t) se utiliza la siguiente expresión:

$$ET_t = H_{t-1} + P_t - T_t \quad (12)$$

La evapotranspiración real será el menor valor entre el resultado de la ecuación anterior y el valor de la evapotranspiración potencial, ya que la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial siempre y cuando exista la humedad suficiente en el suelo.

Como ya se mencionó anteriormente, la infiltración es función del excedente (T_t) así como de la cantidad máxima de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, esto se expresa como sigue:

$$I_t = I_{\max t} \frac{T_t}{T_t + I_{\max t}} \quad (13)$$

De la ecuación anterior se deduce que mientras incrementa el excedente también incrementa la infiltración y, si no existe excedente tampoco existirá infiltración. La infiltración máxima I_{\max} depende, además de las características del terreno, de la

intensidad y concentración de las precipitaciones. La infiltración suele tomar valores de entre 100 mm/mes y 400 mm/mes, dependiendo de si la lluvia es esporádica o persistente (Témez, 1997).

Del excedente, una parte se infiltra y el resto es escorrentía superficial al final del mes "t", y se determina de la siguiente manera:

$$A_{\text{sup } t} = T_t - I_t \quad (14)$$

Para realizar la simulación del acuífero se utiliza un modelo unicelular, basado en la hipótesis de proporcionalidad entre el volumen almacenado en el acuífero (V_t) y el caudal cedido a la red superficial (Q_t). El volumen se relaciona con el caudal mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha * V_t \quad (15)$$

Donde α es una constante [t^{-1}].

Aplicando la ecuación de balance de masa (diferencial ordinaria) al acuífero, tenemos lo siguiente:

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (16)$$

Donde

$I(t)$ = Entradas al acuífero en el tiempo "t" (recargas).

$O(t)$ = Salidas del acuífero en el tiempo "t" (extracciones).

$V(t)$ = Volumen almacenado en el acuífero en el tiempo "t".

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (16) tenemos lo siguiente:

$$I_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (17)$$

Considerando $R(t)$ como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo "t", se tiene:

$$R_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad (18)$$

Al resolver la ecuación diferencial, para un volumen inicial del acuífero V_0 y para un caudal de recarga constante R , tenemos:

$$V_t = V_0 e^{-\alpha \cdot t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \quad (19)$$

Al expresar el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$ se obtiene la ecuación que representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (20)$$

La recarga R se puede expresar como $R = S \cdot I_t$ (donde S es la superficie de la cuenca), puesto que la recarga está formada por el agua infiltrada en el acuífero, por tanto la ecuación para determinar el volumen del acuífero en el mes "t" sería la siguiente:

$$V_t = V_{t-1} e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{S \cdot I_t}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot \Delta t}) \quad (21)$$

Los rangos entre los que pueden oscilar los parámetros de Témez, se concentran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Rangos para los parámetros de calibración del modelo de Témez (Témez, 1977).

Parámetro	Mínimo	Máximo
H_{\max}	50	250
C	0.2	1
I_{\max}	10	150
α	0.001	0.008

2.6.3 Modelo hidrológico HBV

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación escurrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escurrentía empleando una estructura simple y robusta y, un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir la escurrentía a centrales hidroeléctricas en

1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

Una de las versiones más empleadas en investigación y educación es la llamada HBV *light* (Seibert, 2005), aunque la estructura principal del modelo y las representaciones de los procesos presentados en este estudio están basadas en la versión modificada del modelo HBV desarrollado por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Stuttgart, Alemania (Lindström, 1997; Ehret, 2002; Hundecha y Bárdosy, 2004; Ehret, 2002; Das *et al.*, 2006).

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y, por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y, los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y, estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

En la figura 2.3 se ilustran los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye a la escorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es la escorrentía total en

el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo).

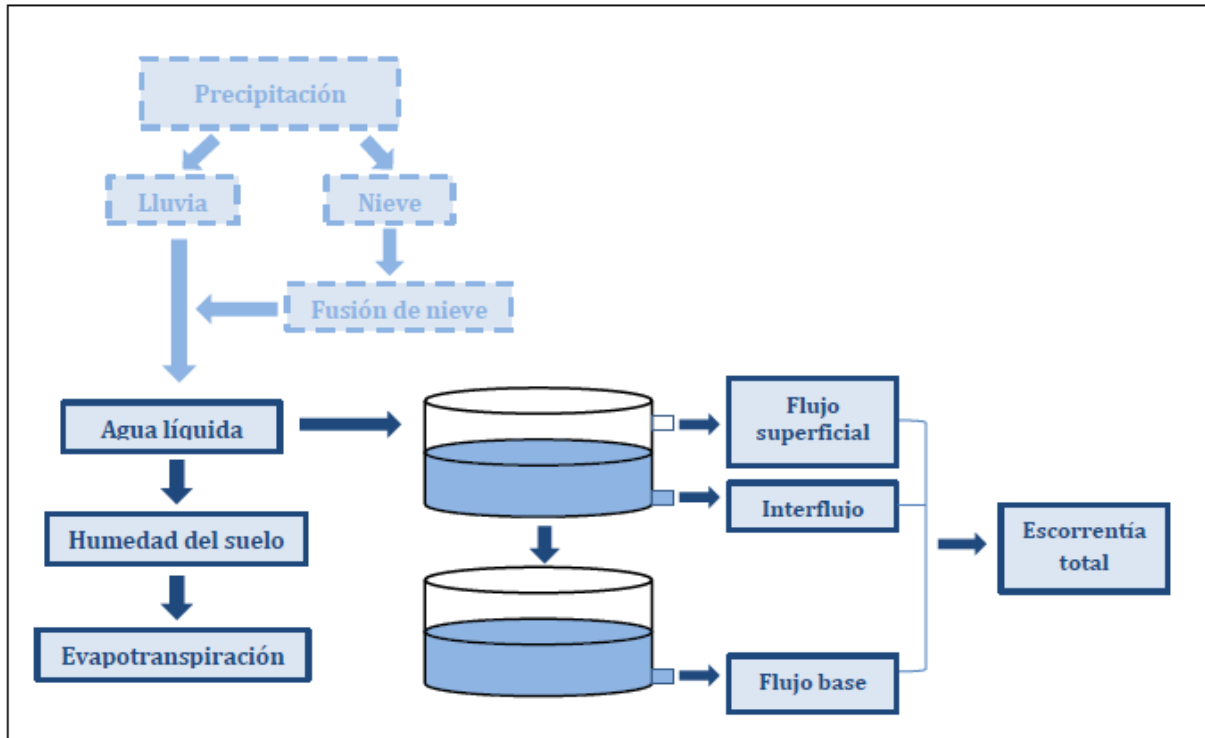


Figura 2.3 Esquema general del modelo HVB

A. Módulo de humedad del suelo

La precipitación caída sobre una cuenca se divide en dos componentes: la primera componente constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración (SM); la segunda contribuye a la escorrentía subterránea. Esta segunda componente (infiltración) es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se definen dos parámetros: la capacidad de campo (FC) que es el parámetro que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial; el segundo parámetro (β) es un parámetro adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La siguiente ecuación calcula la precipitación efectiva en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$Inf\ t = \left(\frac{SM_t - 1}{FC} \right)^\beta * P_t \quad (22)$$

Donde

- Inf Filtración efectiva [L]
 SM Humedad del suelo [L]
 FC Máxima capacidad de almacenamiento del suelo (capacidad de campo) [L]
 P Precipitación diaria [L]
 B Coeficiente de forma (parámetro del modelo) [-]

Dado un déficit de humedad del suelo (medido por la relación SM/FC), el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escorrentía. La figura 9 ilustra la relación entre la capacidad de campo y el coeficiente de filtración según el coeficiente de forma β . Siendo el coeficiente de filtración el cociente entre la filtración calculada y la precipitación (Inf/P).

B. Módulo de evapotranspiración

En el módulo de evapotranspiración se calcula está en base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será igual a la potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (PWP).

$$ET_{rt} = ET_{Pt} \frac{SM_t}{PWP} \quad \text{Si } SM_t < PWP \quad (23)$$

$$ET_{rt} = ET_{Pt} \quad \text{Si } SM_t > PWP \quad (24)$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas. La siguiente figura ilustra la relación entre ET_{rt} y PWP descrita en la

ecuación anterior. Obviamente, PWP ha de tener un valor inferior a FC para que tenga un sentido físico.

C. Balance de humedad en el suelo.

La humedad en el suelo resultante (SM) después de incorporar la precipitación y descontar la filtración y la evapotranspiración

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t - ETr_t - Inf_t \quad (25)$$

Si la precipitación P_t fuera muy elevada, este balance podría dar como resultado un valor de SM superior a FC. En este caso el exceso se asigna como escorrentía directa.

$$Si \ SM_t > FC \quad Q_{st} = \begin{cases} SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{cases} \quad (26)$$

Donde:

Q_s representa la escorrentía directa.

D. Cálculo de la escorrentía subsuperficial.

El flujo subsuperficial se modela mediante dos funciones de descarga. Una descarga rápida (Q_0) que se activa cuando el almacenamiento en el suelo (S1) supera un mínimo (Lm) y se define por un parámetro K_0 .

$$Q_{0t} = K_0 (S1_{t-1} - Lm) \quad si \ S1_{t-1} > Lm \quad (27)$$

$$Q_{0t} = 0 \quad si \ S1_{t-1} < Lm \quad (28)$$

y una descarga lenta que se regula por el parámetro K_1 .

$$Q_{1t} = K_1 * S1_{t-1} \quad (29)$$

Por último, esta celda tiene una descarga por percolación (Q_{perc}) que alimenta la celda de almacenamiento profundo y, se regula con el parámetro K_{perc} .

$$Q_{perc_t} = K_{perc} * S1_{t-1} \quad (30)$$

E. Balance de agua en la celda subsuperficial.

Tras determinar los flujos anteriores se calcula el balance de humedad en la celda subsuperficial como:

$$S1_t = S1_{t-1} + Inf_t - Q0_t - Q1_t - Q_{perc_t} \quad (31)$$

El balance anterior podría resultar negativo si la suma de ($K_0 + K_1 + K_{perc}$) fuera superior a la unidad. En tal caso $S1_t$ se asignaría como cero y se daría un error de balance. Es responsabilidad del usuario definir los parámetros apropiados. Para asegurar que el proceso de escorrentía es el más rápido, el valor de K_0 debe ser siempre mayor que K_1 .

F. Cálculo del balance y la escorrentía subterránea.

Para la simulación de la escorrentía subterránea se utiliza un modelo de celda como en el caso anterior, aunque con un solo parámetro de descarga (K_2) calculándose el drenaje subterráneo (Q_2) como:

$$Q2_t = K_2 * S2_{t-1} \quad (32)$$

Y el balance en esta celda se cerraría con:

$$S2_t = S2_{t-1} + Q_{perc_t} - Q2_t \quad (33)$$

La respuesta de esta celda (Q_2) debe ser más lenta que la primera, por lo que K_2 debería ser menor que K_1 .

G. Cálculo de la escorrentía total.

La escorrentía o aportación total se calcula como la suma de las escorrentías generadas en cada uno de los módulos anteriores. Estos aportes han sido todos calculados en unidades de [mm] por lo que el caudal o volumen final de aportación se obtiene multiplicando por la superficie de la cuenca.

$$Q_t = (Q_{St} + Q_{0t} + Q_{1t} + Q_{2t}) * A \quad (34)$$

La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros del modelo. Además es necesario definir las condiciones iniciales que son la humedad inicial del suelo (SM_0) y los almacenamientos iniciales de ambos tanques (S_{10} y S_{20}).

Tabla 2.5 Parámetros del modelo HBV. Descripción y rangos.

Zona	Parámetro	Descripción	Unidades
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm
	β	Coefficiente de forma para la infiltración	-
	PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm
Celda subsuperficial	Lmax	Umbral de de descarga rápida (tanque superior)	mm
	K0	Coefficiente de descarga rápida (tanque superior)	-
	K1	Coefficiente de recesión (tanque superior)	-
Celda profunda	Kperc	Coefficiente de percolación	-
	K2	Coefficiente de recesión (tanque inferior)	-

Además estos parámetros deberán cumplir algunas condiciones como las siguientes:

- El parámetro FC debería tomar valores comparables a los definidos para $H_{m\acute{a}x}$ en el modelo de Témez.
- PWP no debería ser mayor que FC.
- Los coeficientes K_0 , K_1 , K_2 y K_{perc} no pueden ser mayores que 1,
- Además debería cumplirse que $K_0 > K_1 > K_2$.

- Si la suma de $K_0+K_1+K_{perc}$ es mayor que 1 existe el riesgo de generar un error de balance.

De la estructura del modelo se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escorrentía:

- Los parámetros de humedad en el suelo (FC, PWP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto la escorrentía total generada.
- El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Un valor más bajo aumenta la filtración al nivel subsuperficial.
- El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K_0 y L_m determinan la descarga rápida y, el resto (K_1 , K_{perc} y K_2) regulan la descarga y la curva de recesión del río a largo plazo.

2.6.4 Herramientas de modelación: EVALHID Y PATRICAL.

La necesidad que se tiene actualmente de conocer el ciclo hidrológico, ha encaminado a los modelos matemáticos o de simulación hidrológica, a implementar e incorporar nuevos elementos para el mejor funcionamiento de los mismos. Un ejemplo claro de ellos es el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El modelo de Témez se ha programado dentro de algunos SIG, que hacen más ligera la manera en que se manipula e interpreta la información que requiere el modelo.

La modelación de los escurrimientos para la cuenca del río Tuxpan se desarrolló bajo las ecuaciones del modelo de Témez (Témez 1977), sin embargo se plantea trabajar con dos software que han sido desarrollados incorporando este modelo haciendo uso de los SIG.

El primero de ellos, es el programa PATRICAL, Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua. (Pérez, 2005) y, el segundo se refiere al programa EVALHID, Evaluación de los Recursos Hídricos. (Paredes y Solera, 2011). Ambos software han sido desarrollados y probados por la Universidad Politécnica de Valencia.

El programa Evaluación de los Recursos Hídricos (EVALHID), (Paredes y Solera, 2011), es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) 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. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos.

“Como se ha comentado el modelo que se plantea es conceptual agregado de aplicación semidistribuida. Esto quiere decir que una cuenca que quiera ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben de ser del mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo” (Paredes *et al.*, 2002).

Este módulo tiene la ventaja de poder elegir para cada cuenca (de entre los cuatro con que cuenta), el más adecuado por las características de la misma. Los modelos matemáticos disponibles en esta herramienta son el modelo de Témez (Témez, 1977), el modelo HBV (Bergstrom, 1995), el modelo Sacramento (Burnash *et al.*, 1973), el modelo GR4J (Perrin *et al.*, 2003), el modelo GR2M y, el modelo AWBM.

De los modelos mencionados en el párrafo anterior, el que se utilizará para esta investigación será el modelo de Témez, debido a la facilidad que representa el hecho de que sea un modelo de pocos parámetros además de ser un modelo ampliamente probado.

El **módulo PATRICAL** (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) es un modelo del ciclo hidrológico distribuido espacialmente, con paso de tiempo de simulación mensual (Pérez, 2005).

Los modelos que se construyen realizan la simulación del ciclo hidrológico, en régimen natural o en régimen alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada pequeño elemento (p.e. resolución de 1 km x 1 km) en que discretiza la cuenca hidrográfica, incluyendo la menor posibilidad de evapotranspiración de la vegetación con contenidos bajos de humedad en el suelo, las transferencias laterales entre acuíferos, el movimiento del agua a través de la red fluvial, las relaciones río-acuífero (incluyendo la posibilidad de pérdidas en cauces), y la evolución de la piezometría media de los acuíferos.

La aplicación del módulo desarrollado se realiza mediante la discretización de la cuenca hidrográfica en celdas de pequeño tamaño (p.e. 1 km x 1 km; aunque puede variarse esta configuración en función del tamaño de la cuenca, de la capacidad de procesamiento de los equipos informáticos y, del tiempo de cálculo de la simulación), donde se ajusta, en función de las características fisiográficas propias de cada cuenca, un modelo conceptual de pocos parámetros como el modelo de Témez (Témez, 1977) (que está basado a su vez en el modelo del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS, 1954).

La cuenca que se modela se divide en dos capas o zonas en vertical, una zona superior, formada por la superficie del terreno y discretizada en celdas y; una zona inferior, formada por los acuíferos que, de forma agregada, reciben agua de las celdas superiores. Estas zonas se caracterizan porque, primero, la zona superior representa la superficie del terreno hasta donde alcanza la capacidad de extracción de agua de la vegetación, y se corresponde con la parte de la zona no saturada, donde en sus poros coexisten el agua y el aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo; segundo, la zona inferior o acuífero, representa los almacenamientos de agua subterránea que se producen en la cuenca, se encuentra saturada y las salidas de agua que se producen de la misma son: el desagüe a la red de drenaje superficial, las salidas directas al mar y las transferencias laterales entre acuíferos (Pérez, 2005).

El modelo es de tipo conceptual, de paso de tiempo mensual y, reproduce los principales flujos y almacenamientos de agua del ciclo hidrológico en cada una de las celdas en que se discretiza la cuenca, preservando en todo momento el principio de continuidad o de conservación de la masa.

Los datos iniciales necesarios para el posterior funcionamiento del modelo de simulación son los valores de lluvia total mensual y de temperatura diaria media mensual, procedentes de las estaciones meteorológicas, con los cuales se calcula por interpolación los mapas mensuales de lluvia y temperatura, del que se derivan los mapas de evapotranspiración potencial mensual.

Los mapas mensuales de precipitación y de evapotranspiración potencial son la información de partida para el modelo de simulación. Se calcula en primer lugar la porción de lluvia líquida que cae en cada celda, manteniéndose el resto en forma de nieve sobre la superficie de terreno; en segundo lugar, con dicho valor de lluvia líquida y con las características fisiográficas de la cuenca en cada celda mediante la formulación de Témez, el flujo de excedente generado, la evaporación real producida y el volumen en forma de humedad retenido por el terreno. El excedente, a su vez, se descompone en escorrentía superficial directa y en infiltración a los acuíferos, que interactúan entre sí y se transfieren agua en función de las diferencias de altura piezométrica que tengan. Finalmente, los acuíferos generan la escorrentía subterránea que se suma a la escorrentía superficial formando la escorrentía total, que se acumula a través de la red de drenaje de la cuenca y permite conocer el volumen de agua en cada tramo de la red de drenaje, del que se calcula la reinfiltración a los acuíferos y se obtiene la escorrentía en los cauces.

La figura 2.4 representa el esquema que sigue el flujo bajo las ecuaciones del modelo conceptual de Témez en el módulo PATRICAL.

El modelo lluvia-escurrimiento utiliza los registros históricos de información de la lluvia total mensual y de las temperaturas diarias medias del mes, con los que mediante interpolación se crean los mapas de lluvia mensual distribuida y de temperatura media distribuida, los cuales se introducen como datos en el modelo de simulación para reproducir el ciclo hidrológico, que obtiene como resultados, los mapas

de aportación generada en cada punto de la cuenca. Con los resultados de aportación generada en cada celda se calculan, mediante su desplazamiento a través de la red de drenaje, las aportaciones en cada punto de la red fluvial y las pérdidas en cauces. Finalmente de cada acuífero se obtienen los volúmenes de agua almacenados, transferidos, salidas al mar, y niveles piezométricos.

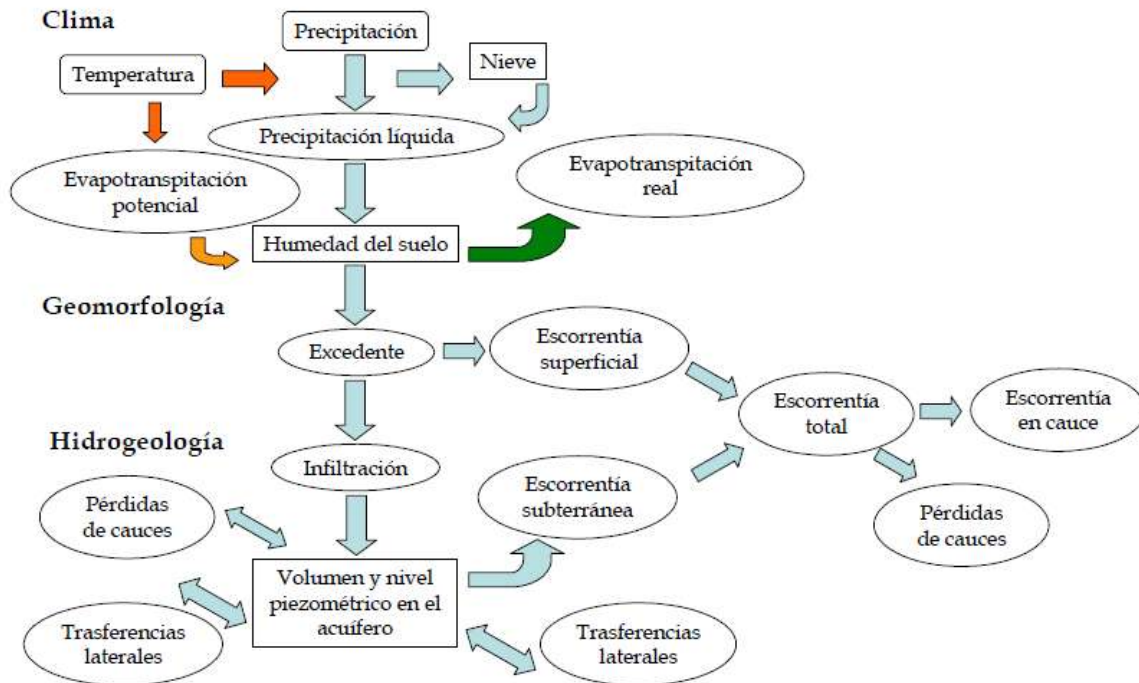


Figura 2.4 Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico en PATRICAL.

2.6.5 Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

La Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 (que en lo sucesivo se denominará NOM-011), Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las agua nacionales; es la metodología que se sigue de manera oficial en México para determinar la disponibilidad media hídrica anual en una cuenca.

La Ley de Aguas Nacionales establece en el artículo 7 fracción I que la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y del subsuelo, a partir de las cuencas hidrológicas en el territorio nacional, son prioridad y asunto de seguridad nacional.

La NOM-011 tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento.

Las especificaciones establecidas en la NOM-011 son de observancia obligatoria para la Comisión Nacional del Agua y para los usuarios que realicen estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales. (CONAGUA, 2015).

Las especificaciones establecidas en la NOM-011 se deben aplicar en los estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en unidades hidrogeológicas. El método que se establece se considerará como el requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita.

La disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales en cuencas hidrológicas clasificadas como grandes (área mayor de 3,000 km²), deberán subdividirse en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, localización de los diferentes usuarios e información hidroclimatológica disponible.

El volumen anual de evapotranspiración, está considerado de manera implícita, en el volumen medio anual de escurrimiento natural, al restarle a los volúmenes aforados en la estación aguas abajo los volúmenes aforados en la estación aguas arriba.

2.6.5.1 Métodos para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural

En la NOM-011 se establecen dos tipos de métodos para la determinación del escurrimiento media anual en una cuenca.

A continuación se hace una descripción detallada de cada uno de ellos.

A. Método Directo

A.1. Registros hidrométricos

Este método se aplica, si en la cuenca en estudio se cuenta con suficiente información hidrométrica para un periodo mínimo de 20 años, en el caso común de tener un sistema de cuencas interconectadas se debe elaborar un esquema de interconexión de la cuenca hidrológica en estudio con las cuencas vecinas, indicando los nombres de los cauces, dirección del flujo y, en su caso, la ubicación de los embalses naturales y artificiales.

B. Métodos Indirectos

En caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información de registros hidrométricos o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se aplica el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

B.1 Precipitación-escurrimiento

El volumen medio anual de escurrimiento natural se determina indirectamente, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca} = \text{Precipitación anual de la cuenca} * \text{Área de la cuenca} * \text{Coeficiente de escurrimiento}$$

B.2. Precipitación anual en la cuenca

Si en la cuenca en estudio se cuenta con suficiente información pluviométrica de cuando menos 20 años, la precipitación anual se determina a partir del análisis de los registros de las estaciones ubicadas dentro y vecinas a la cuenca, mediante el método de Polígonos de Thiessen o Isoyetas.

Cuando en la cuenca en estudio no se cuenta con información pluviométrica o ésta sea escasa, la precipitación anual se podrá obtener con apoyo de los planos de Isoyetas Normales Anuales editados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

B.3 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determina a partir de los siguientes procedimientos:

- Transferencia de información hidrométrica y climatológica de cuencas vecinas, hidrológicamente homogéneas.
- En la cuenca vecina se determinan los coeficientes anuales de escurrimiento (C_e), mediante la relación del volumen de escurrimiento anual (V_e), entre el volumen de precipitación anual (V_p) correspondiente.

$$C_e = V_e / V_p \quad (35)$$

- Con los valores del volumen de precipitación anual y el coeficiente de escurrimiento anual obtenidos en la cuenca vecina, se establece una correlación gráfica o su ecuación matemática.
- Con apoyo de la ecuación matemática o en la gráfica y, al utilizar los valores del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio, se estiman los correspondientes coeficientes anuales de escurrimiento.
- En función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio.
- A falta de información específica, con apoyo en los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables), B (suelos medianamente permeables) y, C (suelos casi impermeables). Al tomar en cuenta el uso actual del suelo se obtiene el valor del parámetro K.
- El coeficiente de escurrimiento depende del parámetro K.

2.7 Michoacán ante el cambio climático

Los desastres hidrometeorológicos son cada vez más comunes en el mundo y en nuestro país. Específicamente para el estado de Michoacán se tiene un registro de los desastres que han ocurrido durante el periodo de 1980 a 2001, donde claramente se aprecia el aumento en la frecuencia e intensidad con que estos se han presentado (CENAPRED 2002).

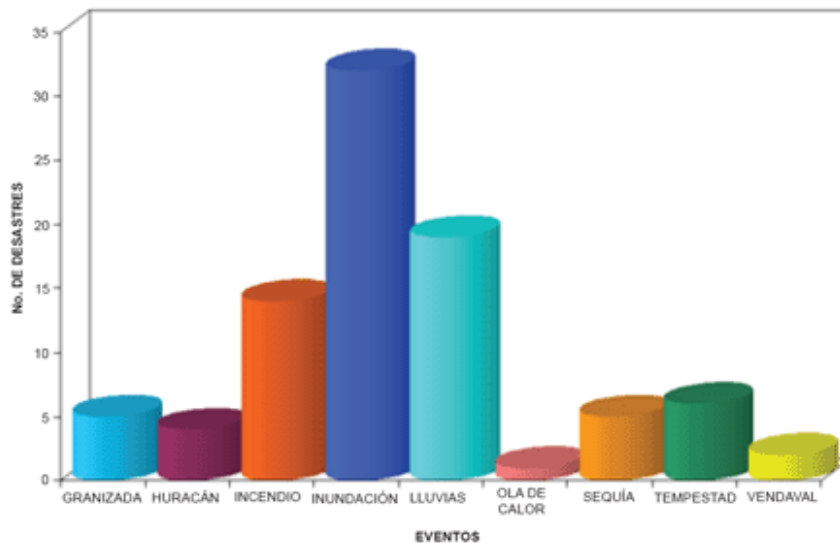


Figura 2.5 Desastres de origen hidrometeorológico ocurridos en el estado de Michoacán (periodo 1980-2001).

En el estado de Michoacán, el impacto del cambio climático ha tenido consecuencias graves. Algunos ejemplos de eventos atribuidos al cambio climático son: en el año 2001, las lluvias torrenciales, deslaves y desbordamientos de ríos y presas provocaron 95 muertes, 126,854 personas afectadas y un total de 14,102 viviendas dañadas, además de 10,000 hectáreas de cultivo perjudicadas. Por otra parte, en el año 2002, se registraron 4 decesos debidos a las bajas temperaturas. En el periodo de julio a septiembre del año 2003, se registraron 23,104 ha de cultivo dañadas, más de 50 caminos afectados y un total de 5,439 viviendas perjudicadas, todo esto debido a las lluvias torrenciales registradas. En el año 2005 se registró una fuerte sequía que ocasionó que se perdieran 14,723 ha de cultivos con un costo total de alrededor de 13.3 millones de pesos (CENAPRED 2002).

La Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA) del Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, manifiesta su interés y preocupación por el cambio climático, priorizándolo como un tema de política de Estado, estratégico y de seguridad estatal, consolidándolo en este sentido, con la finalidad de atender esta problemática y atenuar sus efectos adversos en beneficio de la sociedad.

En el año de 2009, López propuso una metodología para el análisis de eventos extremos de temperatura, estudio realizado para un caso ocurrido en Apizaco, Tlaxcala. El objetivo principal fue establecer una metodología para usarse como guía en el análisis de eventos extremos reflejados en temperaturas (T_{\max} y T_{\min}), hasta ese momento no existía una propuesta de metodología que reflejara el procedimiento a seguir para identificar este tipo de eventos.

Fue en el año 2010 cuando Padilla realizó un importante análisis sobre los deslizamientos de la ladera en la cuenca del río el Charco, en el municipio de Angangueo, Michoacán. El objetivo principal de este trabajo de tesis fue hacer el análisis sobre el deslizamiento ocurrido en esa Cuenca, considerando que el evento fue ocasionado meramente por variables estructurales y del tipo de suelo, y no climatológicas, descartando que el evento fuera influenciado o atribuido al cambio climático. Además propuso algunas medidas de prevención para este tipo de eventos en la zona.

En materia del cambio climático se tiene un trabajo realizado para la evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos (en la cuenca del río grande de Morelia), éste estudio fue realizado por Hernández en 2011, quien analizó de manera integral cuantitativa el efecto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos y, permitió conocer el efecto en los cambios en las demandas urbanas y agrícolas, en la disponibilidad del agua superficial y subterránea, en las aportaciones de la cuenca, en las recargas al acuífero, en la evaporación (embalse) y evapotranspiración (cuenca y Módulos de riego). El proceso se llevó a cabo mediante un modelo de gestión en el cual se evaluaron las garantías y los fallos que se producen en las demandas agrícolas, urbanas e industriales, así como el análisis de la evolución del acuífero y los embalses, que permitieron observar el estado general de los recursos

hídricos. Parte de la metodología descrita en este trabajo, resulta útil en la evaluación de los MCG y los escenarios de cambio climático que mejor ajustan para una zona en estudio.

En el año 2012 se presenta una metodología para la obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia, propuesta por García. El objetivo principal fue la obtención de los escurrimientos con efecto del cambio climático, analizando el modelo de cambio climático que representa mejor las características para la cuenca del río Grande de Morelia y obtener los escurrimientos superficiales.

Finalmente en 2013 se realizó una revisión de eventos hidrometeorológicos extremos en zona continental Mexicana durante el siglo XXI. Drust llevó a cabo un análisis de eventos hidrometeorológicos extremos en México, resaltando que el cambio climático juega un papel importante en la ocurrencia de los mismos, en los últimos años.

3. HIPÓTESIS

El cambio climático afectará la disponibilidad media anual de los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, disminuyendo la cantidad de los mismos, afectando los usos que se tienen en la cuenca.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca hidrológica del río Tuxpan, a corto y largo plazo, mediante el uso de modelos hidrológicos.

4.2 Particulares

Analizar diferentes modelos hidrológicos que permitan distinguir ventajas y desventajas al utilizarlos en una cuenca mexicana.

Hacer una comparativa entre la metodología oficial establecida en México y, los modelos hidrológicos utilizados, con el fin de proponer su uso como herramientas fiables en los estudios de este tipo.

Determinar el Modelo de Circulación General de la Atmósfera que debe utilizarse en la cuenca.

Analizar los escenarios de cambio climático que describan de manera adecuada la tendencia de la zona en estudio, permitiendo la modelación de los escurrimientos superficiales considerando el efecto del cambio climático para cada escenario.

Proponer una metodología del tratamiento que puede darse a las series de datos climatológicos de cambio climático para garantizar que la información conserva las características de la información histórica en la zona de estudio.

Analizar las series históricas de precipitaciones y temperaturas de la zona en estudio, identificando posibles eventos climáticos extremos ocurridos, que servirán como puntos de análisis específicos en la modelación con cambio climático.

Generación de proyecciones hidrológicas en base a los MGC y los escenarios de emisiones y, evaluación de impactos del cambio climático en componentes del ciclo hidrológico y los usos en la cuenca.

Realizar comparativas entre los resultados obtenidos para los diferentes modelos hidrológicos, con el fin de identificar la sensibilidad de cada modelo ante el cambio climático.

5 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años el cambio climático ha sido un tema de interés mundial. Con mayor frecuencia se han registrado eventos meteorológicos extremos que han dejado severos daños económicos y humanos.

Este fenómeno podría llegar a afectar diferentes sectores económicos, políticos y sociales; la magnitud de dicha afectación dependerá de la vulnerabilidad de cada zona, lo que significa que las condiciones climáticas serán diferentes para cada sitio y las variables climáticas reflejarán estas afectaciones en distintas escalas.

El calentamiento global causará en el estado de Michoacán un incremento promedio de la temperatura de 1.4 °C para el año 2030, de 2.2°C para el año 2060 y de 3.4 °C para el año 2090 (Sáenz, 2009); y una disminución promedio de la precipitación del 8.8% para el año 2030, de 14.3% para el año 2060 y de 24.9% para el año 2090. Es previsible que tales cambios ocasionen una disminución de la producción de cultivos agrícolas, de forrajes, de producción frutícola como el aguacate y, se pongan en peligro especies como la mariposa monarca (Sáenz, 2009).

El recurso hídrico es uno de los sectores que más preocupación muestran ante el fenómeno del cambio climático en todo el mundo. Actualmente los recursos hídricos existentes no son suficientes para abastecer la demanda de la sociedad, con fenómenos poco predecibles como lo es el cambio en el clima, la situación se vuelve más preocupante.

En México, como en otros países, ha sido insuficiente la cantidad disponible de agua que una cuenca puede captar; esto se debe a que la cantidad de recurso que demandan los usos consuntivos, es mayor que la disponibilidad hídrica de agua en la zona. La cuenca del Valle de México es un caso emblemático en cuanto a la baja disponibilidad de agua, de acuerdo con la clasificación establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010), esta zona se encuentra bajo un estrés hídrico “muy fuerte” al presentar un 132.9% de presión sobre el recurso (Fig. 5.1). Por esta causa la región está obligada a importar agua de otras cuencas mediante un sistema de regulación de presas llamado sistema Cutzamala. El sistema está integrado por

siete subcuencas repartidas entre el estado de Michoacán y el Estado de México, las cuales mediante la infraestructura existente abastecen de agua a la zona metropolitana del Distrito Federal con más del 20% del volumen total que esta megalópolis consume. La cuenca de mayor superficie es la del río Tuxpan que se encuentra en el estado de Michoacán y que acuerdo con los registros de la Comisión Nacional del Agua, es la que aporta la mayor cantidad de agua a este Sistema.

La disponibilidad del recurso hídrico en esta zona podría verse disminuida por el efecto del cambio climático, o bien podían sufrirse alteraciones en el sistema debido a la ocurrencia de este fenómeno. Al ser considerada la cuenca del río Tuxpan como un elemento importante para el sistema Cutzamala, salta la importancia que tiene evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos para esta cuenca ante el cambio climático.

Debemos prepararnos para las siguientes décadas, con este proyecto además de evaluar el efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca, también se estarán proponiendo herramientas que permitan el análisis de otras cuencas con esta variable.

México no ha desarrollado una metodología clara para la evaluación de los recursos hídricos incorporando la variable del cambio climático, es por ello que la realización de este trabajo presenta aportes interesantes al respecto.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha manifestado la preocupación que el cambio climático podría generar en cuencas importantes como la del río Tuxpan, por lo que es necesario prever escenarios climáticos a futuro que permitan evaluar las consecuencias de este fenómeno en la cantidad de agua disponible en la zona.

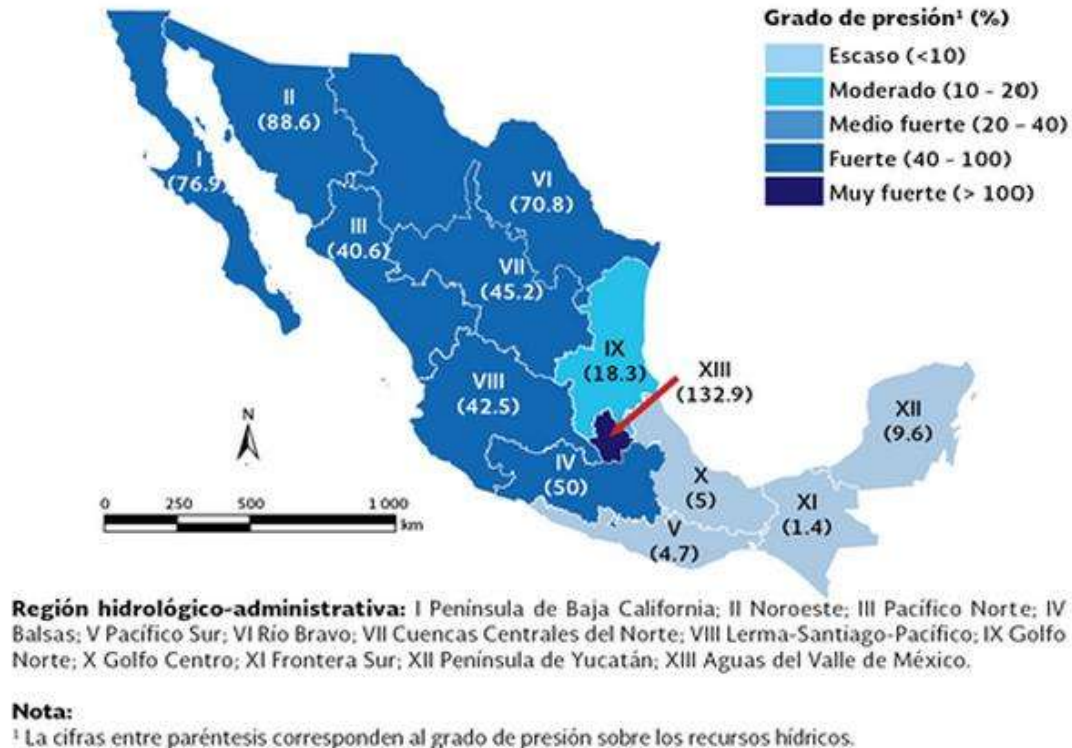


Figura 5.1 Grado de presión sobre los recursos hídricos por región hidrológico-administrativa, 2010.

Fuente: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/06_agua/cap6_2.html

La cuenca del río Tuxpán es la más industrializada, es una de las cuencas del sistema Cutzamala con tendencia a mayor crecimiento en la actividad agrícola de riego; con respecto al uso del suelo, se observa, en la cabecera de la subcuenca dos grandes áreas de bosques bien conservados, cuya superficie corresponde al 75% de la superficie de la zona funcional alta y, que son zonas protegidas por formar parte de uno de los santuarios más importantes de la mariposa monarca (importante atractivo turístico en la zona).

En los últimos años la cuenca del río Tuxpan ha comenzado a presentar déficit hídrico (INECC, 2011) y se han presentado algunos eventos meteorológicos extremos que han causado controversia en cuanto a la naturaleza de su ocurrencia.

Con base en estos argumentos resulta importante el estudio del efecto que el cambio climático podría ocasionar para esta zona. Con apoyo en la modelación

matemática y los MCG, se puede llegar a hacer importantes conclusiones de manera cuantitativa y cualitativa, sobre los proyectados efectos que el cambio climático tiene preparados para la cuenca en estudio (Fig. 5.2).



Figura 5.2 Ubicación espacial de la cuenca del río Tuxpán

6 METODOLOGÍA

La metodología a seguir para realizar esta investigación consta de varias etapas que a continuación se describen.

6.1 Análisis y caracterización de la zona en estudio.

Esta etapa consiste en realizar el análisis geográfico de la zona en estudio, la delimitación y la caracterización de la misma. El reconocimiento de la zona que se va a estudiar permite tener en mente las características propias de ésta para poder tomar las decisiones adecuadas cuando se requiera; además puede orientar al modelador en el análisis de los resultados que se obtengan, permitiendo comparar éstos contra los que se pudieran tener en zonas estudiadas anteriormente.

6.2 Recopilación de información y datos.

Para realizar este trabajo es necesario llevar a cabo la recopilación de la información necesaria para todo el proceso, para lograrlo se debe analizar qué es lo que se requiere para llevar a cabo el estudio y cómo o de dónde puede obtenerse. A continuación se hace un listado de la información que fue requerida para este proyecto y las especificaciones necesarias para explicar al lector el sitio donde se obtuvieron

- ❖ Datos de Precipitación, temperatura. Estos datos serán obtenidos a partir de las estaciones climatológicas ubicadas cerca de la cuenca o dentro de ella. Para estos datos se recurrirá a la base de datos de Clima Computarizado (CLICOM).
- ❖ Las series de evapotranspiración se calculará a partir de los datos de temperatura y precipitación obtenidos anteriormente, utilizando el método de Thornthwaite (Anexo 1).
- ❖ Capas de cobertura vegetal y uso de suelo. Son mapas en formato vectorial obtenidos de la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

- ❖ Las demandas de agua por parte de los sectores: urbano, agrícola e industrial. Esta información puede obtenerse en el portal digital de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2013)
- ❖ Datos de precipitación y temperatura considerando los efectos del cambio climático, los cuales están disponibles para trabajos de investigación en la página del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

6.3 Análisis y validación estadística de la información.

La información recopilada debe cumplir con ciertos requisitos para que pueda considerarse como estadísticamente válida. Para ello se realiza esta etapa, utilizar este tipo de datos debemos estar seguros de la confiabilidad de los mismos, ya que de ello dependerá en gran medida la calidad de los resultados obtenidos.

Se aplica la correlación espacio-temporal para cada estación utilizada y se conocerá su independencia, su sesgo y su consistencia, así como algunos otros estadísticos que ayuden a conocer la calidad de los datos.

6.4 Aplicación del modelo lluvia-escorrentamiento para la serie histórica.

Existe en todo el mundo una gran variedad de modelos hidrológicos del tipo lluvia-escorrentamiento, los cuales pueden ser utilizados para México si se toman las consideraciones apropiadas y se cuenta con la información que requiere el modelo.

Parte importante de esta etapa consiste en probar diferentes modelos hidrológicos para la modelación de la cuenca del río Tuxpan. El primero se trata del modelo de Témez, éste se utiliza bajo dos concepciones distintas, la primera es de manera agregada y la segunda de manera distribuida.

Por otra parte se utiliza también el modelo HBV, el cual es un modelo agregado que de acuerdo con la información disponible puede ser utilizado para esta cuenca.

La aplicación de todo modelo lluvia-escurrimiento implica varias etapas que son importantes para que éste funcione de manera correcta:

- Calibración del modelo. Para obtener resultados confiables del modelo lluvia-escurrimiento, y que simule verdaderamente las situaciones que ocurren en la cuenca, es necesario llevar a cabo la calibración del mismo, ajustando los parámetros de calibración de acuerdo con la sensibilidad de cada uno de éstos en el modelo.
- Validación del modelo. Una vez calibrado el modelo, se elige un periodo de datos para validar, esto significa verificar que los resultados simulados por el modelo están apegados a lo que realmente sucede en la cuenca.
- Obtención de los escurrimientos sin considerar el efecto del cambio climático. Al ingresar los datos al modelo calibrado y validado, se pueden hacer simulaciones para el periodo histórico y actual, obteniendo los escurrimientos superficiales que se generan en la cuenca, para el periodo de tiempo seleccionado o disponible.

6.5 Aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

La determinación de la disponibilidad hídrica media anual para una cuenca en México puede obtenerse a través de la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. La información que se requiere para su aplicación forma parte de los requerimientos en los modelos hidrológicos.

Esa etapa permite obtener los escurrimientos naturales en la cuenca del río Tuxpan a través de la metodología oficial para nuestro país.

6.6 Modelación incluyendo escenarios de cambio climático

Una vez construido el modelo de lluvia-escurrimiento, se simulan los diferentes escenarios de cambio climático a través de los datos proporcionados por el INECC. Los nuevos escenarios de cambio climático (INECC, 2012) proporcionan cambios en

variables como temperatura y precipitación, que se verán reflejados en los escurrimientos a la salida de la cuenca. Esta etapa permite evaluar estas variaciones y determinar la disponibilidad hídrica para periodos futuros bajo las condiciones establecidas.

Los periodos de modelación con cambio climático están definidos por la naturaleza de la información generada por el INECC, de acuerdo con los datos obtenidos se han definido dos periodos de modelación futuros: corto plazo (2039-2075) y largo plazo (2075-2099).

6.6.1 Determinación de los modelos y escenarios

Determinar el escenario de cambio climático y el Modelo de Circulación General (MGC) para la zona en estudio, depende de las fuentes de información que se tengan disponibles para México y de las tendencias de desarrollo económico, industrial y social que se proyecten en la cuenca

Se realiza la modelación para la cuenca en estudio a partir de los MCG (modelo ensamble) y los diferentes escenarios de cambio climático que han sido utilizados para las investigaciones sobre cambio climático en México (escenarios RCP), y que son proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Los escenarios obtenidos a través de los Modelos de Circulación General (MCG) en la actualidad son los más confiables, debido a que tienen un fundamento teórico, y tratan de predecir el clima con base no solo en los comportamientos históricos de las variables, sino al comportamiento futuro de las mismas, expresando resultados con un bajo grado de incertidumbre.

De acuerdo a la información de Magaña y Caetano (2007) México cuenta con escenarios regionalizados gracias a investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Autónoma de México (UNAM), en conjunto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC); Se han presentado más de 20 MCG usados por el IPCC, la aplicación del método estadístico permite que se tengan

entre 50 y 90 experimentos de escenarios de cambio climático regionalizados para México, considerando escenarios de emisiones de GEI (A2, A1B, B1, COMMITED) con lo que se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC en 2007.

De esta etapa obtendremos el MCG que mejor describe el comportamiento futuro del clima para la zona en estudio, así como el escenario de cambio climático que mejor ajusta con el desarrollo del sitio.

Actualmente, México ha desarrollado nuevos escenarios de cambio climático como resultado del quinto reporte emitido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014), se conocen como la familia de los escenarios RCP, éstos han sido generados a través del MGC conocido como Ensemble.

6.6.2 Obtención de series con efecto del cambio climático.

Existen algunos Institutos de Investigación que se encargan de generar los datos regionalizados de cambio climático para nuestro país. A partir de la modelación matemática se emplean los Modelos de Circulación General que han sido desarrollados por otros países y mediante herramientas estadísticas se hace la regionalización de los mismos para México. El resultado son series que describen o proyectan los valores de precipitaciones y temperaturas que podrían presentarse en nuestro país para periodos de tiempo futuros.

Actualmente en México, la mayoría de los estudios acerca del cambio climático se hacen utilizando el modelo Ensemble, que como su nombre lo dice resulta de una combinación de 15 MCG, que regionalizados para nuestro país, dan la información de precipitaciones y temperaturas proyectadas a futuro. Estas herramientas son desarrolladas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en

inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Lo anterior, en el marco del estudio denominado “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”.

6.6.3 Metodología para tratamiento de datos de cambio climático.

Como se ha mencionado anteriormente, las series de cambio climático puestas a disposición de los investigadores y del público en general por parte del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), son datos que han sido desarrollados con herramientas desarrolladas en otros países y regionalizados para poder utilizarlos en México.

Las proyecciones de los escenarios de cambio climático RCP, han sido generadas a partir del ensamble de 15 Modelos de Circulación General (metodología descrita en el apartado 6.6). La información utilizada para generar estas proyecciones se obtiene de la base de datos meteorológicos internacional, CRU, la cual presenta información de precipitaciones y temperaturas a escala mundial, por lo que la discretización de la información está dada a escala muy grande.

En todo estudio de investigación la información disponible para la correcta realización del mismo es muy importante y, en los estudios de cambio climático la información climática adquiere una especial relevancia, por lo que es necesario contar con una base de datos climáticos lo más completa posible y de esta manera tener una mayor confiabilidad de los resultados que se obtengan.

Cuando se realizan estudios que involucran cambio climático, surge el inconveniente de que la información que es proporcionada por el INECC se encuentra a escalas regionales mayores a las zonas en las que se está llevando a cabo el estudio, por ello en este trabajo se ha llegado a establecer una metodología para tratar los datos que se descargan del portal del INECC estableciendo una relación entre ellos y la información histórica propia de la zona que se está estudiando; esto permite crear un vínculo entre la información generada a partir de las proyecciones y los datos registrados por las estaciones climatológicas reales que tienen influencia en la cuenca.

Para obtener las series de modelación afectadas por la variable de cambio climático, es necesario encontrar una anomalía de precipitación o temperatura (según sea el caso) que está afectando a cada dato de la serie, por ello debe determinarse la anomalía para cada escenario RCP (4.5, 6.0 y 8.5) y, para cada uno de los doce meses del año (Barrios, 2007). Encontrar esta anomalía mensual implica obtener los promedios mensuales de la serie histórica de la base de datos de la CRU, y los promedios mensuales de cada una de las series de cada escenario RCP. Se deben restar a cada dato promedio mensual de la serie proyectada el correspondiente promedio del mismo mes pero de la serie histórica. Se obtendrán entonces doce anomalías de precipitación o temperatura para cada escenario y para cada periodo de años en que éstos están dados (corto y largo plazo). Las anomalías deben trasladarse a los sitios de interés a través de la interpolación.

Para este caso se utilizó el método del Inverso de la Distancia Euclidiana al cuadrado (IDW) para hacer este proceso de traslado o proyección de la información. Los sitios donde deben proyectarse las anomalías están determinados por la naturaleza del modelo hidrológico, es decir, los puntos donde se traslade la anomalía de cada mes debe coincidir con los puntos de las estaciones climatológicas utilizadas en la modelación hidrológica. El objetivo de hacer coincidir esta información en el mismo punto se plantea para poder sumar a la serie histórica real, la anomalía de precipitación o temperatura a cada uno de los meses. De esta manera se obtiene para cada sitio una serie de datos afectada por la variable de cambio climático para cada escenario y para cada periodo de tiempo en que estén dadas las series de cambio climático.

La serie histórica tendrá que repetirse tantas veces en el tiempo como sea necesario hasta llegar a los periodos de donde se hayan obtenido las anomalías, para poder hacer la suma correspondiente en cada dato.

La figura 6.1 muestra de manera esquemática el procedimiento que se sigue para el tratamiento de las series de cambio climático antes de ser utilizadas en los modelos hidrológicos.

6.7 Comparación de resultados de la modelación hidrológica (periodo actual vs cambio climático)

Una vez obtenida la modelación de la serie histórica de los escurrimientos para la cuenca y, la modelación de los mismos pero considerando los efectos del cambio climático; se puede hacer una comparación de los resultados. Se cuenta con dos modelaciones para periodos históricos, una considerando los efectos del cambio climático y la otra simulando el clima que de acuerdo con los datos climatológicos disponibles ocurrió. Partiendo de los resultados obtenidos de los modelos se pueden hacer conclusiones a cerca de la afectación que tendrá el cambio climático para periodos futuros; de esta manera pueden tomarse medidas que permitan aprovechar los recursos hídricos de manera adecuada bajo los distintos escenarios de cambio climático planteados en los modelos.

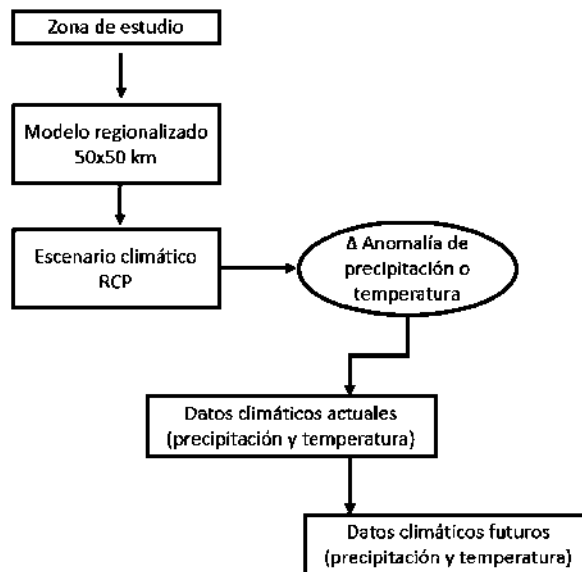


Figura 6.1 Esquema metodológico del tratamiento aplicado a las series de cambio climático.

6.8 Análisis de resultados

Esta es la etapa final de la metodología. Este es el paso es donde se lleva a cabo el análisis de los resultados. Por medio del análisis de éstos será posible

determinar el Modelo de Circulación General de la Atmósfera y el escenario climático que mejor ajusta para la zona de estudio.

La figura 6.2 hace una representación esquemática de la metodología empleada en este trabajo.

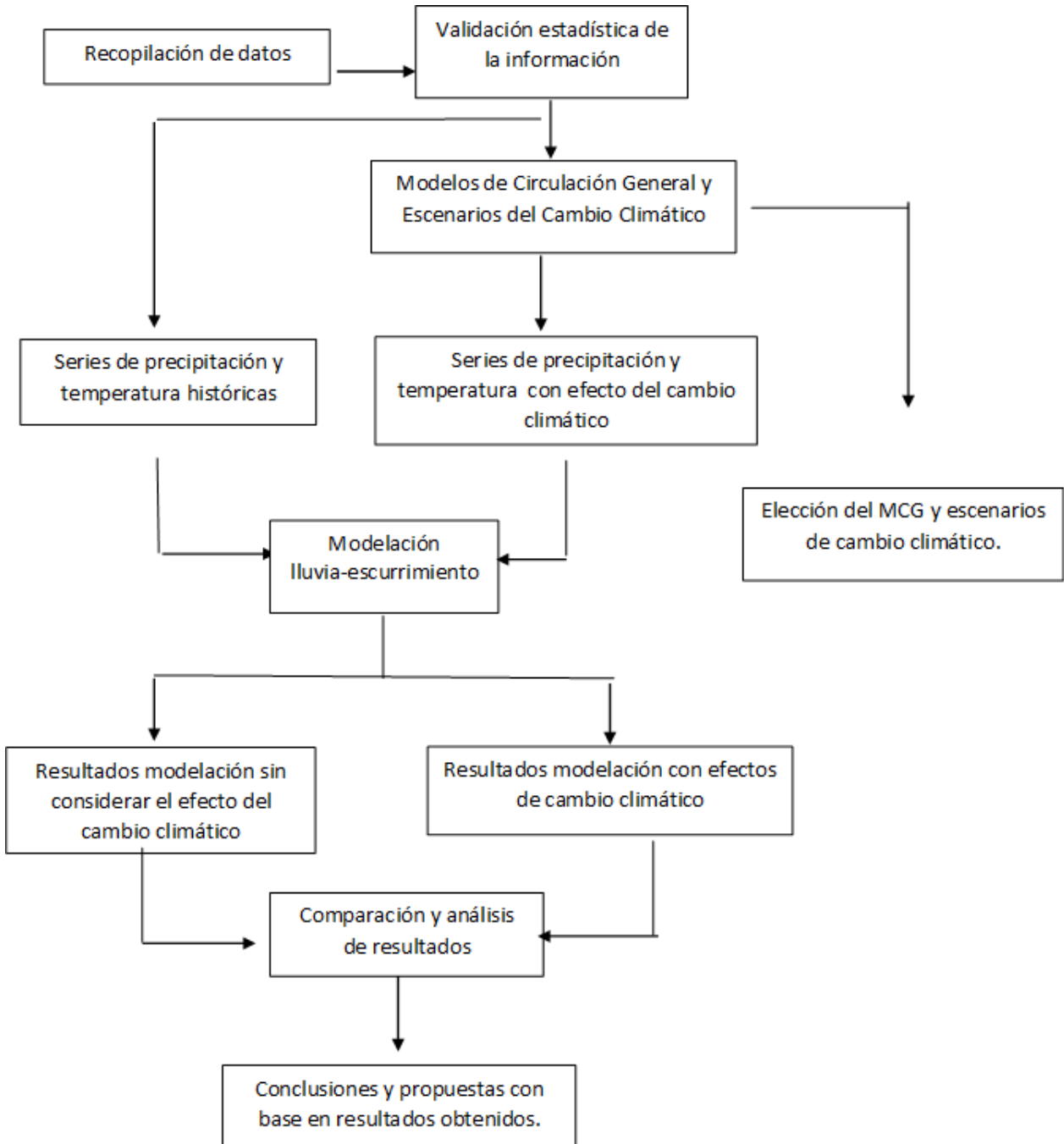


Figura 6.2 Metodología empleada.

7 RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán de manera detallada los resultados obtenidos en este trabajo, además de los procesos que se siguieron para la obtención de los mismos.

La etapa de la modelación hidrológica es sin duda muy importante a lo largo del proceso, ya que de aquí se desprenden conclusiones importantes que permitirán evaluar algunos escenarios propuestos. Para llevar a cabo la modelación matemática, es necesario presentar datos de diferentes sectores, tales como estaciones meteorológicas e hidrométricas; series de precipitación y temperatura generadas a partir de los modelos de cambio climático y para cada uno de los escenarios planteados.

7.1 Conocimiento de la zona en estudio

El análisis económico, político y social para una cuenca, permite resaltar aspectos importantes que llevan al modelador a conocer y a entender el funcionamiento total de la zona para tomar las decisiones más adecuadas durante el proceso de simulación (modelación).

En México existen 314 cuencas, integradas en 37 grupos, que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) maneja en 13 Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHA), con un Organismo de Cuenca en cada una. La cuenca del río Tuxpan se encuentra en la RHA número IV, que lleva por nombre Balsas.

Una RHA está integrada por varias Regiones Hidrológicas (RH), en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. La zona en estudio pertenece a la RH número XVIII, que también lleva el nombre de Balsas, específicamente en la región Medio Balsas.

La cuenca del Río Tuxpan se ubica en el sistema hidrológico nacional en la parte denominada subcuenca del río Tuxpan, al oriente del Estado de Michoacán, (Fig. 7.1).



La Cuenca se ubica en el estado de Michoacán, abarcando los municipios de Hidalgo, Ocampo, Tuxpan, Irimbo, Maravatío, Zinapécuaro, y porciones muy pequeñas de los municipios de Queréndaro, Senguio y Zitácuaro (Fig 7.2).

Se extiende entre los paralelos $17^{\circ} 00'$ y $20^{\circ} 00'$ de latitud norte y los meridianos $97^{\circ} 27'$ y $103^{\circ} 15'$ de longitud al oeste de Greenwich y, los 1,260 y 3,640 msnm (ver mapa de relieve de la cuenca, fig. 7.3), cubriendo una extensión de 1,197 km².

Las figuras 7.4 y 7.5 muestran los cuerpos de agua que existen en la zona de estudio y los cauces principales en la cuenca. Se cuenta con tres presas: Sabaneta, Pucuató y Agostitlán, más adelante se describen las características de cada una de ellas.

Las figuras 7.6 a 7.10 presentan las características de usos y tipos de suelo en la zona, además de la geología y las particularidades del acuífero. Todos estos elementos son fundamentales para la modelación de la cuenca.

ZONA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TUXPÁN, MICHOACÁN

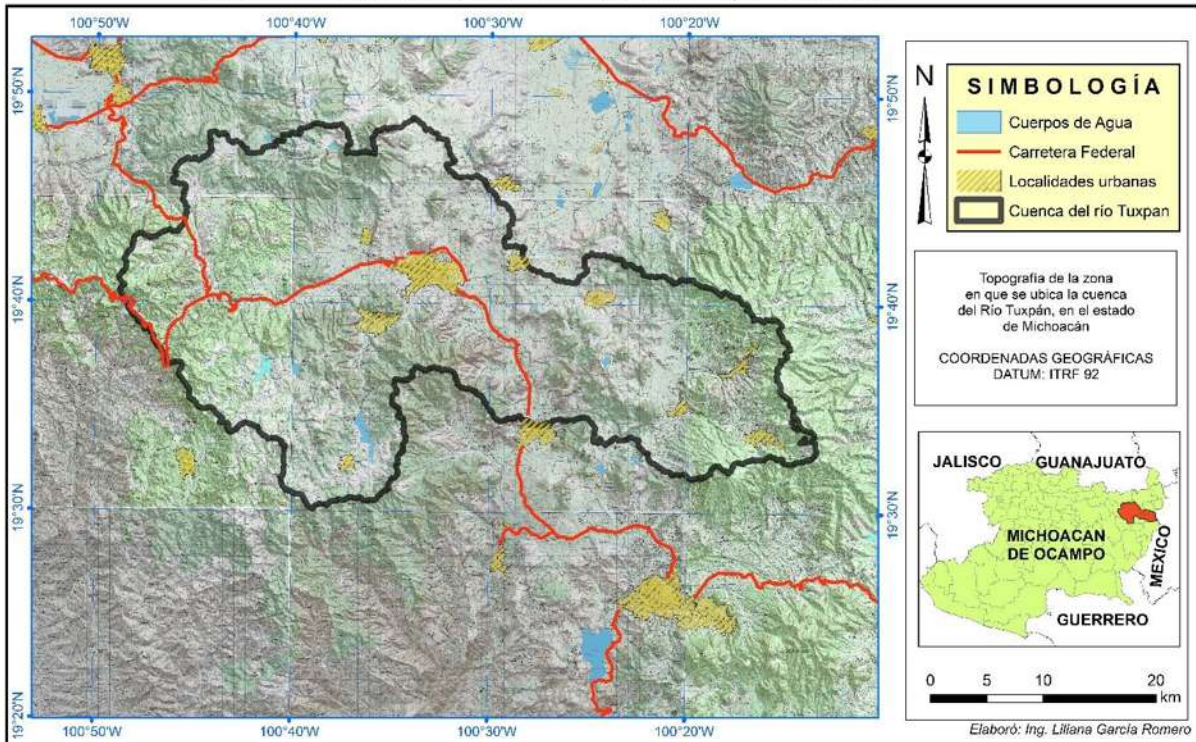


Figura 7.2 Ubicación espacial de la zona en estudio. Carreteras y poblaciones en la cuenca del río Tuxpan.

RELIEVE DE LA CUENCA

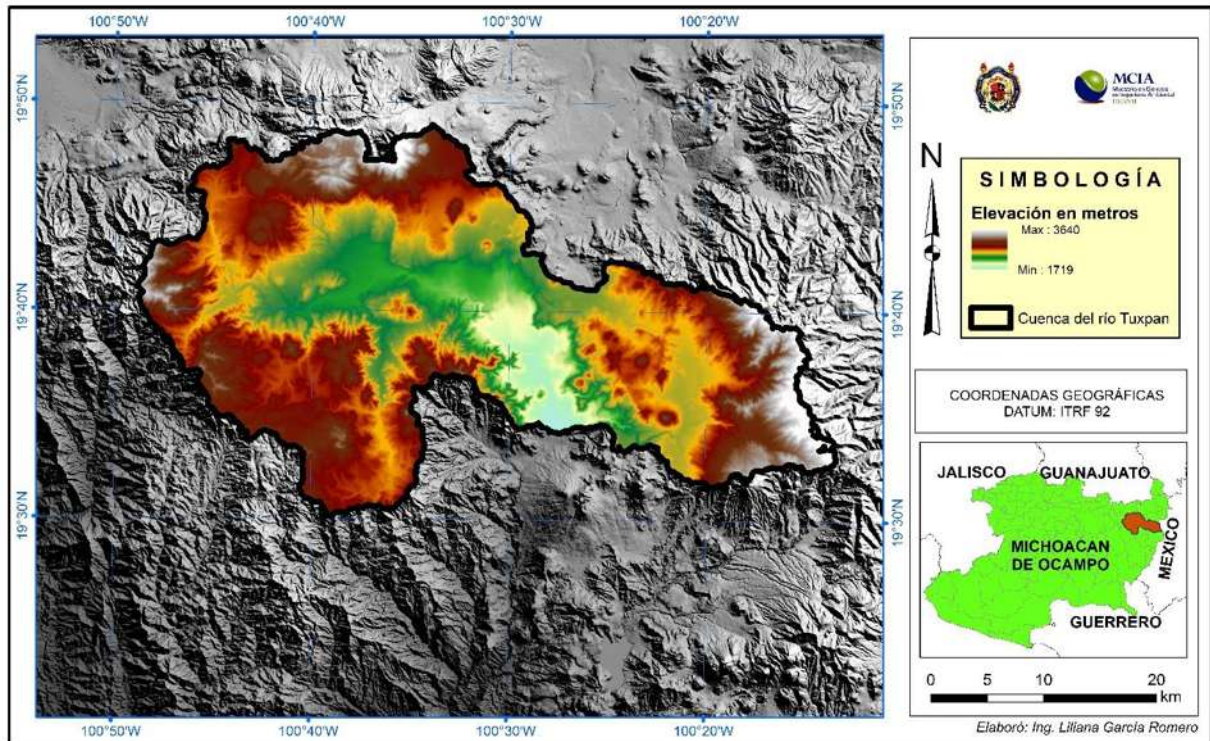


Figura 7.3 Mapa de relieve en la cuenca del río Tuxpan.

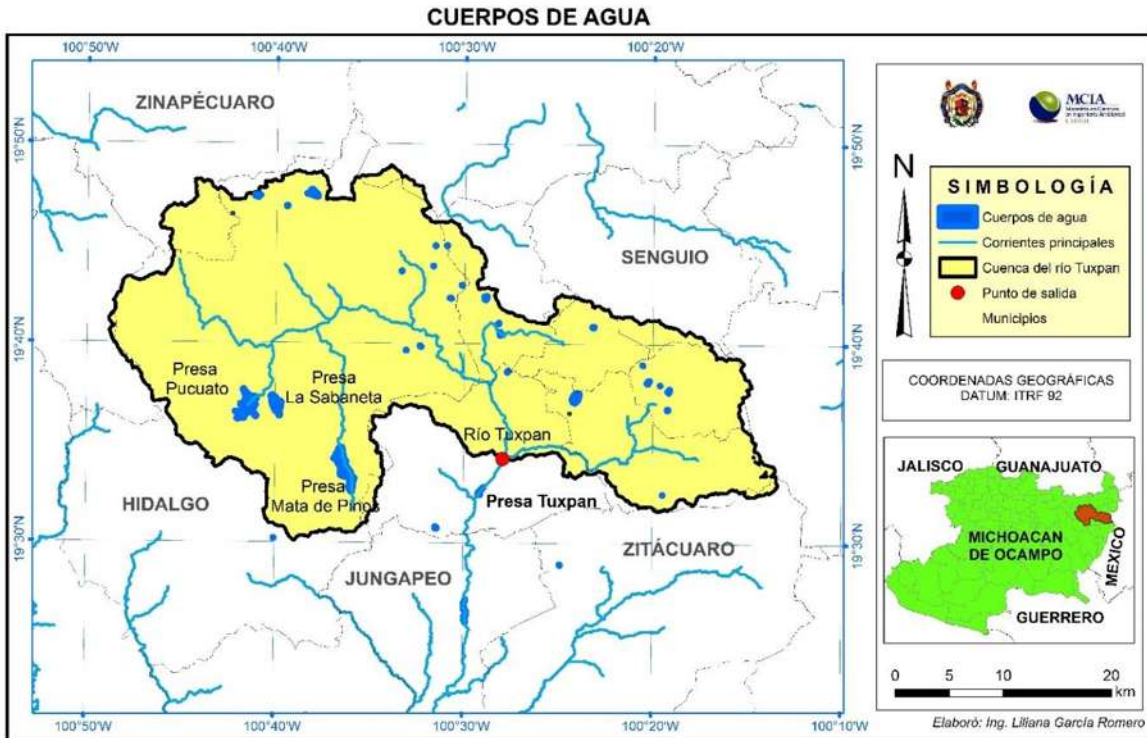


Figura 7.4 Presas y cuerpos de agua. Existen tres presas importantes: Sabaneta, Pucuató y Agostitlán.

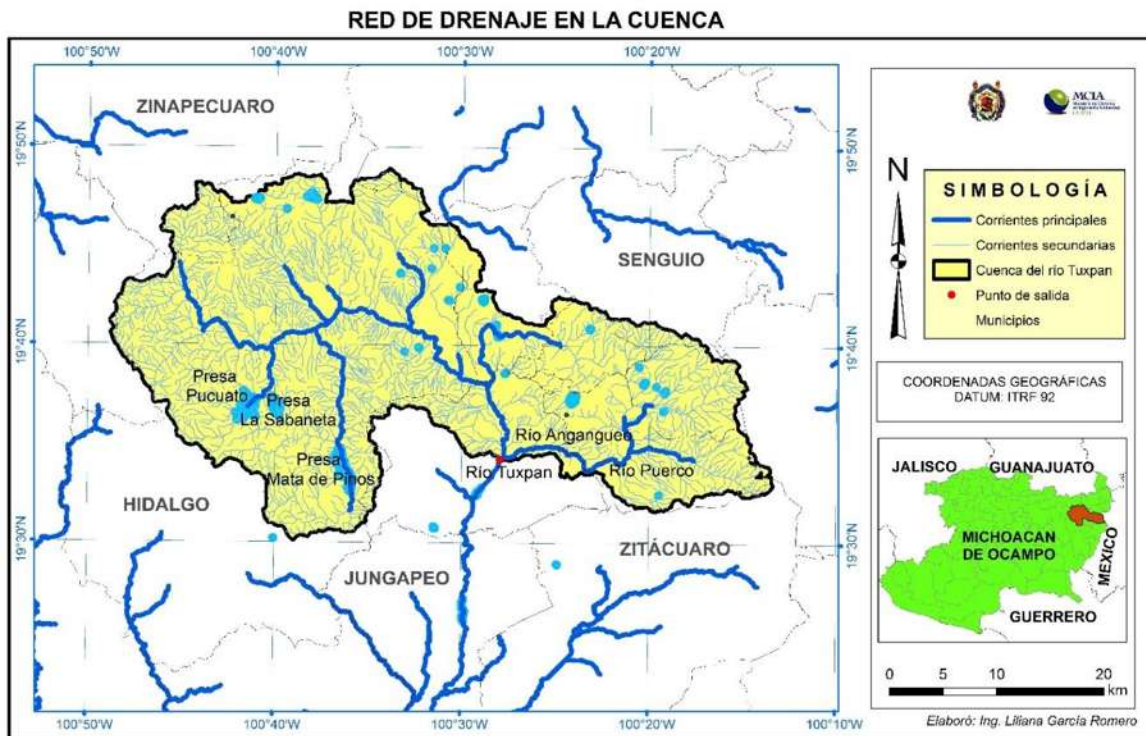


Figura 7.5 Red de drenaje en la cuenca del río Tuxpan. Cauces principales y secundarios.

USOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN

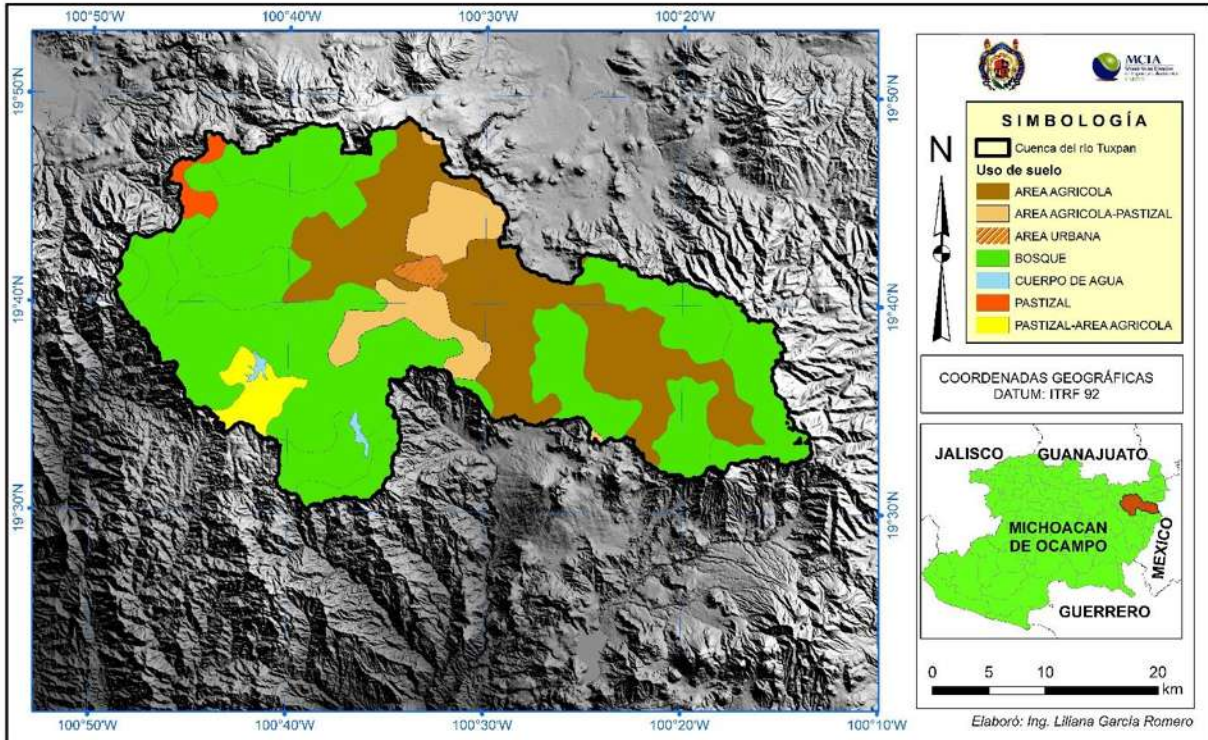


Figura 7.6 Usos que se dan al suelo en la cuenca del río Tuxpan

TIPOS DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN

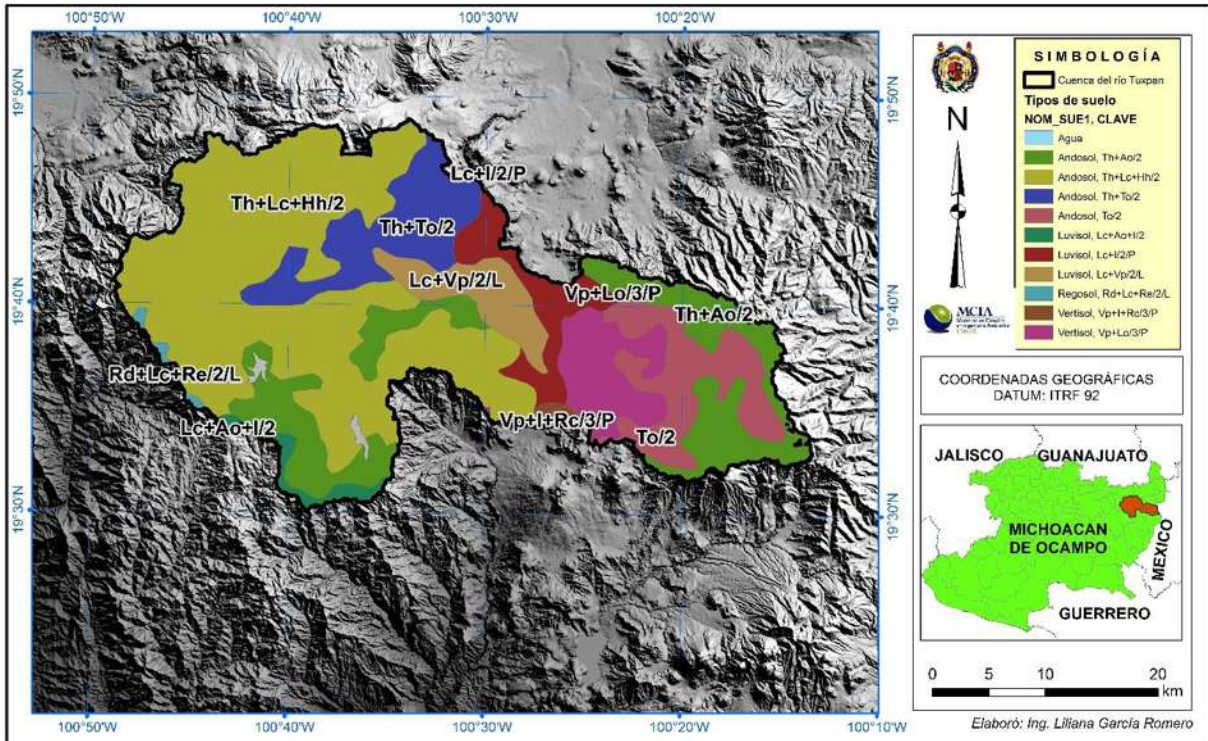


Figura 7.7 Tipos de suelo en la cuenca del río Tuxpan



Figura 7.8 Acuífero Ciudad-Hidalgo Tuxpan

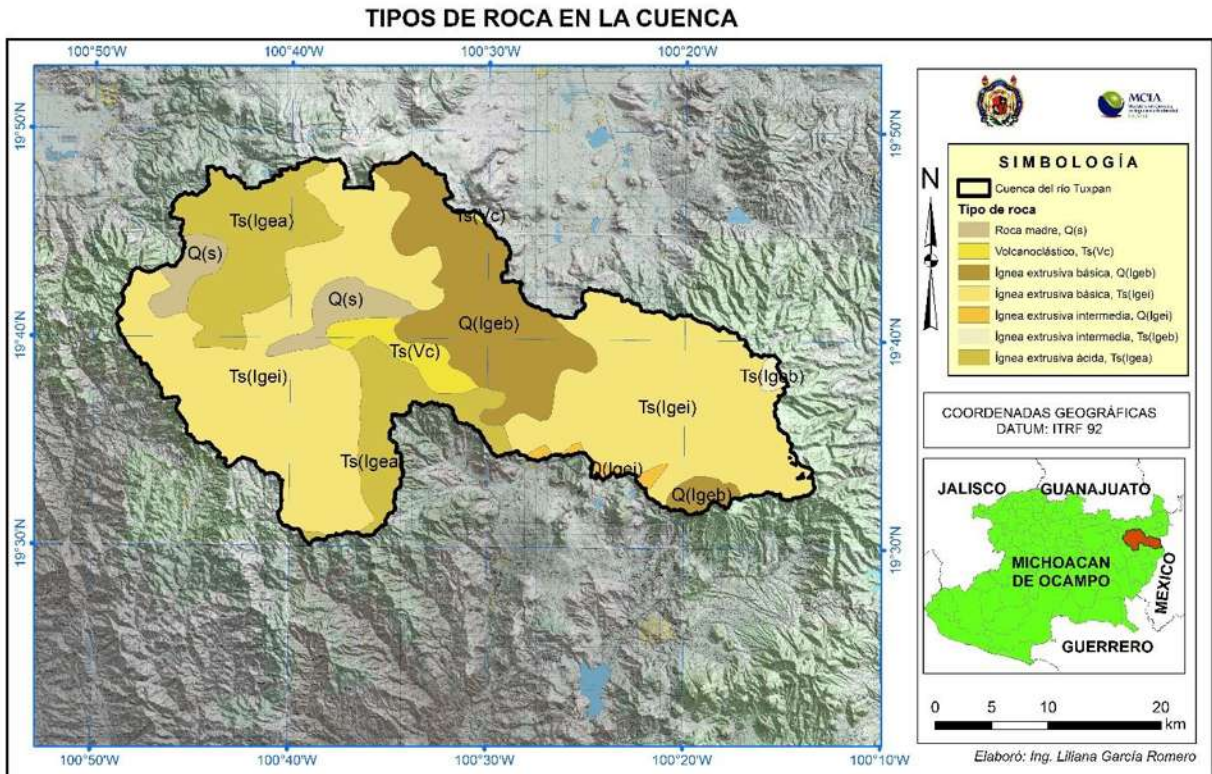


Figura 7.9 Formaciones geológicas (tipos de roca) en la cuenca del río Tuxpan

La cuenca del río Tuxpan alberga especies importantes como la mariposa Monarca, dentro de esta zona se encuentra un Santuario de la especie mencionada anteriormente. Los Santuarios de la Monarca, están considerados entre las cuatro bellezas naturales reconocidas por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad en suelo nacional.

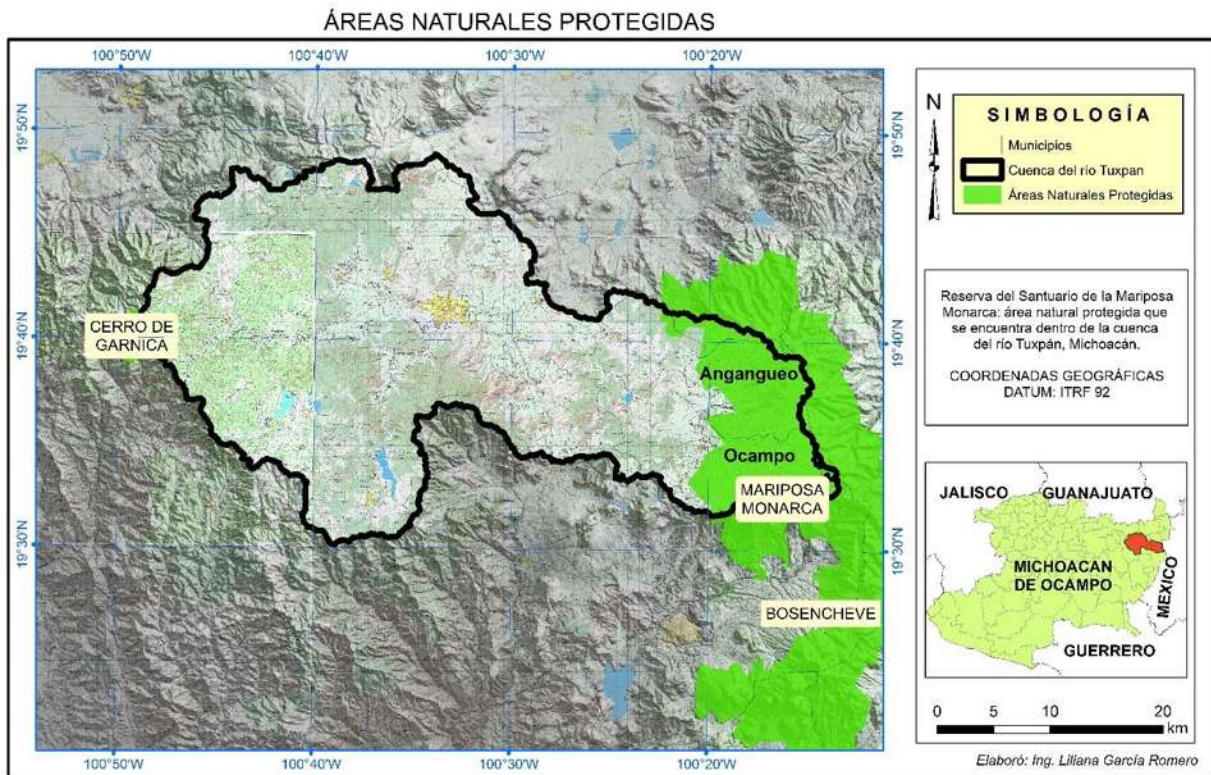


Figura 7.10 Áreas naturales protegidas. Santuario de la mariposa Monarca.

Cada año, entre octubre y marzo, las mariposas monarca encuentran en los bosques mexicanos las condiciones ideales para desarrollarse y aparearse: altitud (2,300-3,500 metros sobre el nivel del mar), temperatura, humedad y exposición a los rayos solares, entre otros.

El cambio climático podría afectar las condiciones climáticas del sitio, provocando alteraciones en los hábitats de especies como la Monarca.

7.2 Demanda Urbana

El abastecimiento urbano es un servicio básico e incuestionable, de obligada e irrenunciable prestación por parte de las administraciones públicas. Su abastecimiento es fundamental, dado que se encuentra dentro de ella el bienestar de la sociedad que requiere el agua para vivir.

Para estimar la cantidad de agua que demanda el uso urbano en una región, es necesario hacer una proyección de la población para un periodo de 30 años a futuro.

Conocer la demanda urbana actual en la cuenca, permite evaluar los impactos del cambio climático en este sector utilizando las proyecciones hechas con los MGC.

7.2.1 Proyección de la población

Para llevar a cabo la proyección de la población se utilizaron cuatro métodos diferentes, de los cuales se elegirá el que mejor describa la tendencia de crecimiento o decaimiento de la población para la cuenca.

Los métodos empleados son:

1. Método aritmético
2. Método geométrico
3. Método de los mínimos cuadrados
4. Método de la curva exponencial

Los municipios involucrados en la cuenca son doce, (ver mapa 7.8); de los cuales Ocampo, Angangueo y Áporo, se encuentran en su totalidad dentro de la cuenca, lo que significa que el cien por ciento de su población requiere la demanda de agua. Por otro lado dentro de la cuenca existen municipios como Hidalgo, Tuxpan, Irimbo, Maravatío y Zinapécuaro, que no se encuentran en su totalidad dentro de la cuenca, sin embargo gran parte de su población se encuentra involucrada en la zona de estudio. Finalmente, los municipios de Queréndaro, San José del Rincón, Senguio y Zitácuaro, no aportan población para realizar la proyección, esto se debe a que dentro de la cuenca solo existen pequeñas porciones de sus superficies que no tienen asentadas

ningún tipo de localidad, por lo que su aportación es nula para la proyección de la población y la demanda.

El cálculo de la proyección se hizo para cada una de las poblaciones que se encuentran dentro de la Cuenca (Ver mapa 7.9). Se aplicaron los cuatro métodos mencionados anteriormente (descripción en anexo 1), esto para cada población y se observó cuál de ellos es el que mejor describía la tendencia del crecimiento o decaimiento de cada zona.

Para realizar las proyecciones de la población, se utilizaron datos de los censos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

La proyección se realiza a partir del último censo que se tiene registrado.



Figura 7.11 Municipios involucrados en la cuenca en estudio.

Tabla 7.1 Datos censales para las poblaciones de la cuenca del río Tuxpan (INEGI, Varios años).

	MUNICIPIO	NÚMERO DE LOCAIDADES	CENSOS				
			1990	1995	2000 (hab/año)	2005	2010
1	ANGANGUEO	21	9,693	9,696	10,120	10,366	10,805
2	APORO	11	2,492	2,543	2,768	2,511	3,218
3	HIDALGO	221	84,973	95,393	99,738	103,655	112,519
4	IRIMBO	18	5,400	6,634	6,977	6,192	8,207
5	MARAVATÍO	1	0	277	259	145	230
6	OCAMPO	40	11,540	15,288	18,768	20,624	22,628
7	TUXPAN	74	16,569	22,255	22,932	23,373	25,183
8	ZINAPÉCUARO	5	2,198	2,257	2,314	1,931	2,047
TOTAL CUENCA			132,865	154,343	163,876	168,797	184,837

Tabla 7.2 Método de proyección de la población empleado para cada municipio de acuerdo con las tendencias de crecimiento o decaimiento de la población en cada caso.

	MUNICIPIO	MÉTODO DE PROYECCIÓN
1	ANGANGUEO	Geométrico
2	APORO	Geométrico
3	HIDALGO	Exponencial
4	IRIMBO	Geométrico
5	MARAVATÍO	Geométrico
6	OCAMPO	Geométrico
7	TUXPAN	Geométrico
8	ZINAPÉCUARO	Geométrico

La proyección de la población se calculó para 25 y 75 años a futuro. Estas proyecciones serán utilizadas para la modelación con cambio climático a corto y largo plazo.

Los resultados de la proyección de la población se muestran en la tabla 7.3.

Tabla 7.3 Proyección de la población por cada municipio. Finalmente se muestra la proyección de la población a nivel de cuenca.

	MUNICIPIO	NÚMERO DE LOCALIDADES	PROYECCION DE LA PORBLACION			
			ACTUAL 2015	30 2045	60 2075	90 2105
1	ANGANGUEO	21	11,103	13,069	15,301	18,011
2	APORO	11	3,436	5,089	7,440	11,021
3	HIDALGO	221	120,713	184,045	276,686	421,850
4	IRIMBO	18	9,134	17,358	32,287	61,357
5	MARAVATÍO	1				
6	OCAMPO	40	26,794	73,849	196,778	542,361
7	TUXPAN	74	27,997	52,858	97,704	184,466
8	ZINAPÉCUARO	5	2,013	1,819	1,649	1,490
	TOTAL CUENCA	391	201,189	348,086	627,846	1,240,555

7.2.2 Proyección de la demanda

Teniendo la proyección de la población, se procede a determinar la proyección de la demanda para el número de habitantes calculado.

La proyección de la demanda se realizó a nivel de localidad, a nivel municipio y a nivel de cuenca. Para lograrlo, es necesario conocer el tipo de clima que hay en la región, a partir de éste dato se obtiene la dotación de la población en l/hab/día, considerando también el nivel socioeconómico de la zona en estudio.

La figura 7.12 muestra los climas que predominan en la zona de estudio, mismos que se utilizaran con los fines explicados anteriormente.

El consumo de agua se determina de acuerdo con el tipo de usuarios, se divide 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 (tabla 7.4).

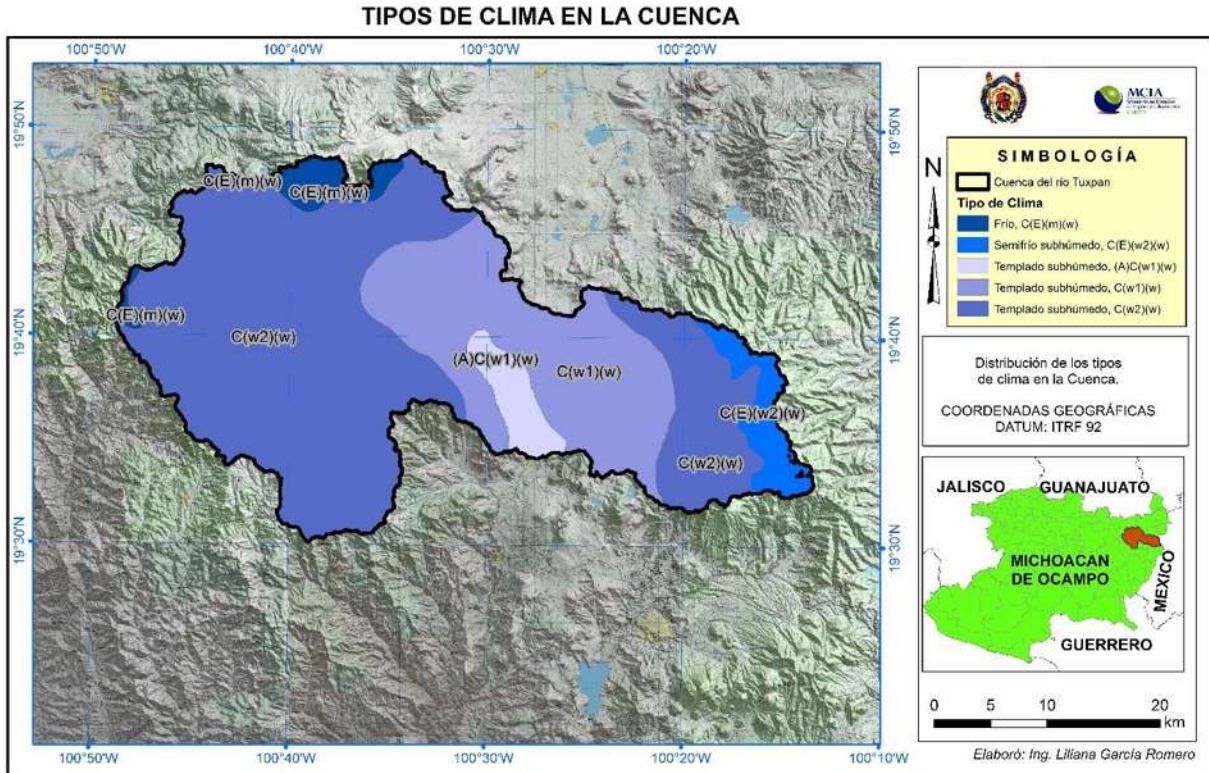


Figura 7.12 Climas predominantes en la región. Éstos deben compararse con los valores de temperaturas medias presentados en la tabla 7.5 para obtener la dotación.

Tabla 7.4 Consumos domésticos per cápita

CLIMA	CONSUMO POR CLASE SOCIOECONÓMICA (l/hab/día)		
	RESIDENCIAL	MEDIA	POPULAR
CALIDO	400	230	185
SEMICALIDO	300	205	130
TEMPLADO	250	195	100

NOTA:

Para los casos de climas semifrio se consideran los mismos valores que para el clima templado.

El clima se selecciona en función de la temperatura media anual (ver tabla 2)

Tabla 7.5 Clasificación de climas por su temperatura (Tabla 2)

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	TIPO DE CLIMA
Mayor que 22	CALIDO
De 18 a 22	SEMICALIDO
De 12 a 17.9	TEMPLADO
De 5 a 11.9	SEMIFRIO
Menor que 5	FRIO

De acuerdo a las características socioeconómicas de la zona, la dotación seleccionada es la que corresponde al nivel popular, y para ciertas localidades específicas se utilizó la dotación media y residencial de acuerdo a los estándares de vida de la población.

Para obtener el gasto medio diario, se utilizó la siguiente expresión:

$$Q_{med} = \frac{DP}{86400} \quad (36)$$

Donde:

Q_{med} = Gasto medio diario en l/s

D = Dotación, en l/hab/día

P = Número de habitantes

86400 = s /día

Tabla 7.6 Proyección total de la demanda urbana. Se anexa en esta tabla las proyecciones de la demanda a 25, 75 y 90 años, que serán requeridas en la modelación con cambio climático.

MUNICIPIOS	DEMANDA Hm3/año			
	2015	2045	2075	2105
ANGANGUEO	0.8	1.3	1.5	2.3
APORO	2.8	4.9	5.3	8.4
HIDALGO	7.5	13.0	14.2	22.5
IRIMBO	0.6	1.0	1.1	1.7
OCAMPO	1.3	2.3	2.5	4.0
TUXPAN	1.6	2.7	3.0	4.7
ZINAPÉCUARO	0.1	0.2	0.3	0.4
TOTAL DEMANDA	14.69	25.41	27.91	44.07

7.3 Demanda Agrícola

En México, es la demanda agrícola la que consume los volúmenes más altos del recurso agua (con un 77% del total disponible). Se trata además de una demanda elástica ya que varía con los cultivo y con las estaciones del año.

En la cuenca del río Tuxpan, se encuentra ubicado el distrito de riego 045, que lleva por nombre “Distrito de Tuxpan”.

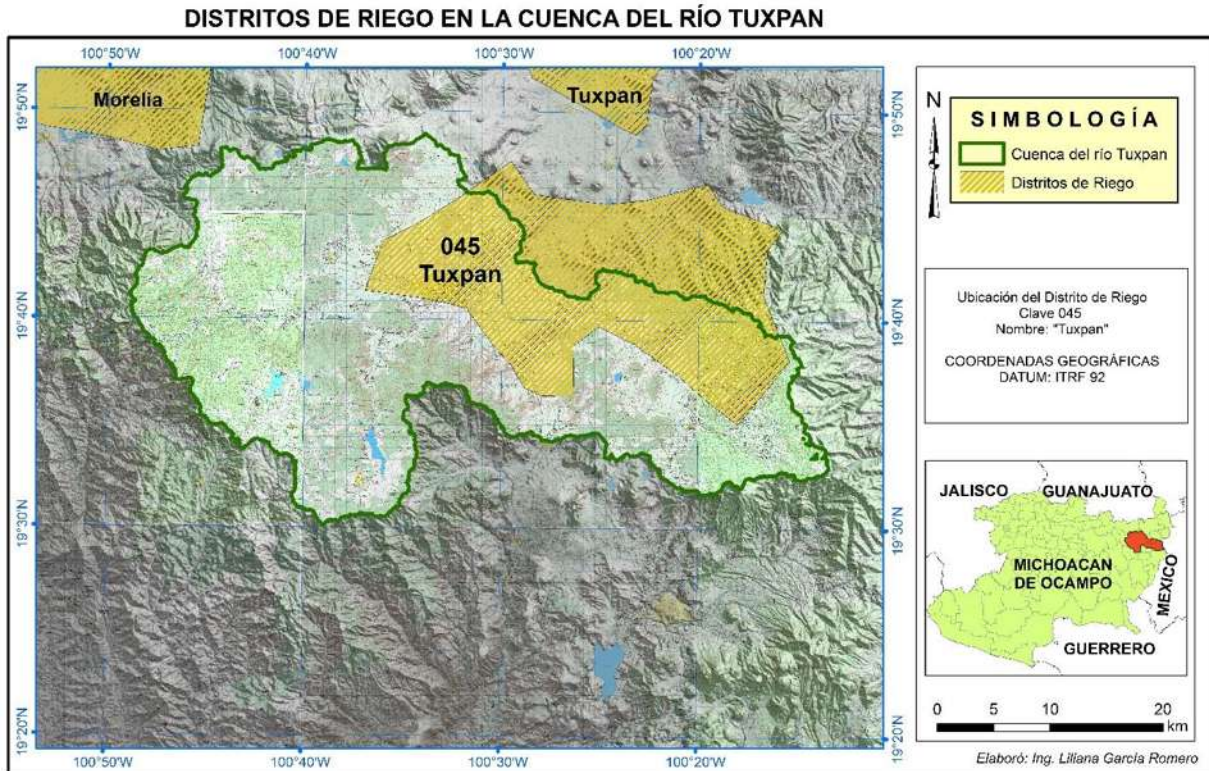


Figura 7.13 Distrito de riego 045, Tuxpan.

El distrito de riego 045 Tuxpan se localiza en el estado de Michoacán, en las coordenadas 19°42'00" de latitud Norte, 100°33'00" de longitud Oeste, altitud 1,770 msnm, en las regiones hidrológicas 08 Lerma-Santiago-Pacífico y 04 balsas (Fig. 7.13); formado por dos unidades de riego, la unidad "Maravatío" (3 módulos de riego dentro del organismo de cuenca Lerma-Santiago-Pacífico) en la primera región y la unidad "Hidalgo" en la otra (4 módulos de riego dentro del organismo de cuenca balsas). Tiene una superficie dominada de 25,060 ha y una superficie regable de 19,557 ha.

El distrito está conformado por siete módulos: el módulo 1, al que corresponde el 20.38% de la superficie total del distrito de riego; el módulo 2, con el 11.24%; el módulo 3, con el 17.92%; el módulo 4, con el 18.19%; el módulo 5, con el 5.95%; el módulo 6, con el 14.67% y; el módulo 7, con el 11.65% de la superficie total (Fig. 7.14).

Tabla 7.7 Usuarios y superficies por tipo de Tenencia.

MODULO	SUPERFICIE EN Ha			USUARIOS		
	Ejido	Pequeña prop.	Total	Ejido	Pequeña prop.	Total
1	3,495	513	4,008	1,719	235	1,954
2	1,842	344	2,185	777	162	939
3	1,971	1,523	3,494	891	317	1208
4	995	2,536	3,530	712	837	1,549
5	782	393	1,175	281	170	451
6	1,393	1,475	2,868	635	468	1,103
7	1,792	593	2,385	631	235	866
Suma	12,270	7,377	19,645	5,646	2424	8,070

7.3.1 Cultivos principales

En el distrito de riego 045, los principales cultivos en cuanto a superficie sembrada son: el maíz grano con un 41.97%, seguido de la avena forrajera con un 12.92%, guayabo con un 9.97%, fresa con un 6.70%, los demás cultivos aunque son de importancia económica no rebasan el 4% de superficie física sembrada.

Los módulos que quedan dentro de la cuenca del río Tuxpan, son el módulo 4,5, 6 y 7. A continuación se describen datos importantes del distrito por cada uno de los módulos (Fig. 7.14).

Para los fines que persigue este trabajo, del Distrito de Riego solo interesa el módulo Hidalgo, ya que es la única zona que es abastecida por la cuenca en estudio. El segundo módulo es abastecido con aguas de la cuenca Lerma-Chapala.

MODULO 4: TAXIMAROA AGOSTITLÁN-PUCUATO-SABANETA A.C.

Este módulo abarca dos municipios, que son Irimbo e Hidalgo, con un total de 13 canales, los cuales son utilizados por un total de 1,915 usuarios (tabla 7.8).

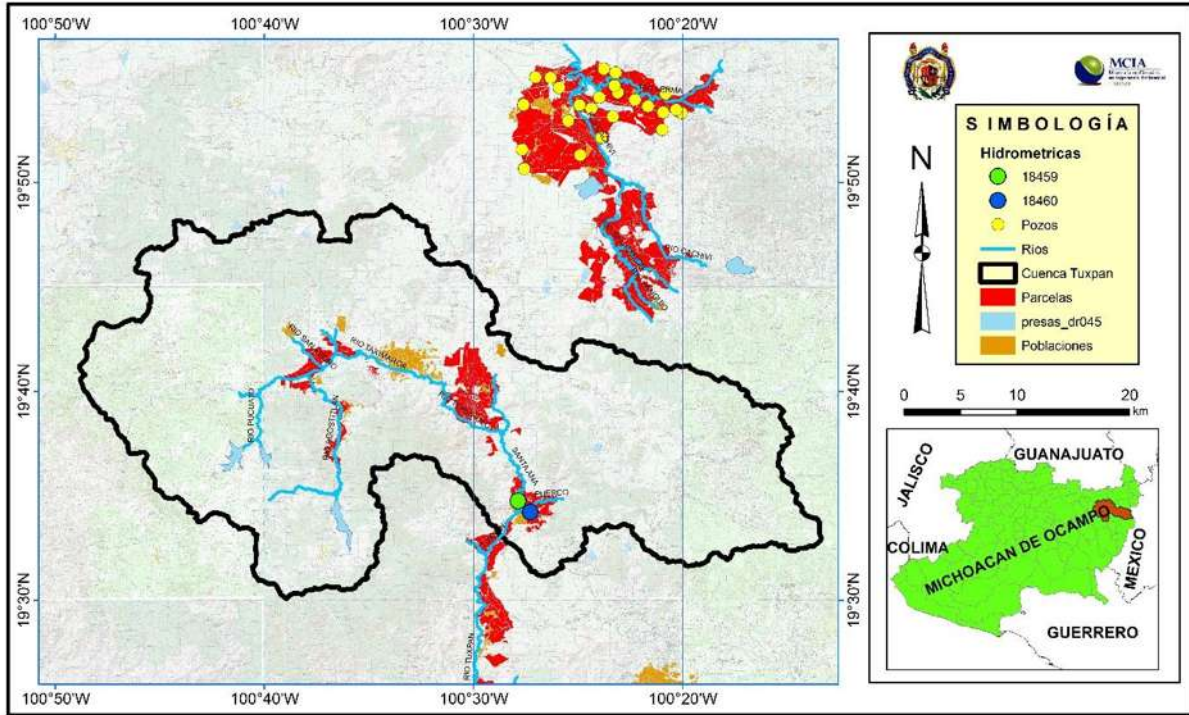


Figura 7.14 Módulos del distrito de Riego 045

Tabla 7.8 Cauces principales en el módulo de riego 04.

CANAL PRINCIPAL	HA. DOMINADAS	LONGITUD	LATITUD
CANAL TECOLOTE	117.84	100.668	19.655
CANAL TECOLOTILLO	33.04	100.669	19.654
CANAL CHAPARRO	112.69	100.608	19.586
CANAL ADOBES	55.54	100.607	19.586
CANAL TORTUGA	34.84	100.605	19.630
CANAL SAN LUCAS	495.97	100.604	19.631
CANAL PALMITAS	8.42	100.641	19.645
CANAL PORVENIR	177.57	100.616	19.660
CANAL CANOAS	18.77	100.603	19.652
CANAL REYES	68.02	100.615	19.664
CANAL CUCHIPITO	61.51	100.680	19.674
CANAL HIDALGO	2280.14	100.670	19.668
CANAL SAN ANGEL	107.81	100.585	19.693
TOTAL	1183.17		

MODULO 5: LOS ZARCOS A.C.

El modulo “Los Zarcos A.C.” abarca únicamente el municipio de Hidalgo, dominado por los manantiales de San Lorenzo; Arroyo del Diablo y Santa Rosa, los cuales son utilizados por un total de 455 usuarios.

MODULO 6: SANTIAGO-TUXPAN, MICH. A.C.

El modulo Santiago-Tuxpan, Mich. A.C. abarca tres municipios, que son Irimbo, Hidalgo y Tuxpan, con un total de 11 canales, los cuales son utilizados por un total de 1,420 usuarios (tabla 7.9).

Tabla 7.9 Canales de abastecimiento del módulo de riego 6 (Santiago-Tuxpan)

CANAL PRINCIPAL	HA. DOMINADAS	LONGITUD	LATITUD
CANAL ALTO TURUNDEO	785.72	100.521	19.662
CANAL COFRADIA	661.17	100.516	19.648
CANAL BAJO TURUNDEO	59.69	100.480	19.668
CANAL AGUA AMARILLA	5.67	100.468	19.608
CANAL TUXPAN	302.47	100.468	19.607
CANAL PRESA VIEJA	9	100.464	19.599
CANAL POZO AZUL	63.37	100.453	19.582
CANAL SAN VICTORIANO	751.12	100.428	19.580
CANAL LAS PILAS	59.42	100.431	19.581
CANAL EL MOLINO	64.05	100.433	19.581
CANAL EL MUERTO	78	100.448	19.578
TOTAL	2839.68		

MODULO 7: CANOAS-HUANGUITIO A.C

El modulo Canoas-Huanguitio abarca dos municipios, que son Zitácuaro y Jungapeo, con un total de 12 canales, los cuales son utilizados por un total de 958 usuarios (tabla 7.10).

Se cuenta con los volúmenes utilizados por el distrito de riego 045, del periodo 2007-2013, por tipo de cultivo y por cada uno de sus nódulos; lo que permite analizar cómo ha ido cambiando la demanda agrícola en los últimos años.

Tabla 7.10 Tomas de agua sobre el canal principal dadas en Mm³, incluye longitudes y ubicación geográfica.

CANAL PRINCIPAL	HA. DOMINADAS	LONGITUD	LATITUD
TOMA LAGUNA SECA	7.78	100.488	19.534
TOMA CORUCHA	75.26	100.489	19.517
TOMA CHALUPA	145.3	100.488	19.514
TOMA EL CLARIN	168.25	100.481	19.501
TOMA EL MELONAL	249.8	100.472	19.490
TOMA EL OTATAL 1	168.7	100.469	19.479
TOMA EL OTATAL 2	54.3	100.471	19.455
TOMA PUERTO HUIRO	1009.78	100.473	19.453
TOMA PIEDRAS DE LUMBRE	226	100.465	19.439
TOMA ARMADILLOS	60.5	100.455	19.443
TOMA TIMBINEO 1	100	100.449	19.414
TOMA TIMBINEO 2	78	100.449	19.413
TOTAL	2343.67		

7.4 Demanda Industrial

Los volúmenes de extracción en la cuenca del río Tuxpan para demanda de tipo industrial, sólo se tiene registrado en dos municipios: Hidalgo y Zinapécuaro.

Tabla 7.11 Demanda industrial por título en la cuenca del río Tuxpan.

Municipio	Título	Titular	Vol de extracción que ampara el título (m3/año)	Vol aprovechamientos superficiales (m3/año)	Vol. aprovechamientos subterráneos (m3/año)
Hidalgo	04MCH100310/18FVGC12	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES	21,558,360.00	0	21,558,360.00
	04MCH100213/18FOGC12	COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, CAMPO GEOTERMICO LOS AZUFRES	15,768.00	15,768.00	0
Zinapcuaro	08MCH100312/12FVGC12	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES	22,441,640.00	0	22,441,640.00
	08MCH122944/12FOGE04	JOSE MANUEL SOSA BARRERA	1,503.36	1,503.36	0
TOTALES =				17,271.36	44,000,000.00

7.5 Información Meteorológica

Los datos necesarios para la modelación es obtenida de la base de datos denominada Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

7.5.1 Selección de estaciones principales

La selección de estaciones principales se hizo de acuerdo a las características que poseen las series de datos históricos. Se asignó cierto peso a cada una de las siguientes variables, acomodadas en orden de importancia.

1. Distancia al centro de gravedad.
2. Porcentaje de datos vacíos en la serie.
3. Intervalo de tiempo
4. Número de datos.

Haciendo una ponderación de las variables citadas anteriormente, se eligieron en total 21 estaciones (tabla 7.12) considerando también que éstas cubrieran en su totalidad la cuenca.



Tabla 7.12 Características de las estaciones seleccionadas.

	Codigo	Nombre	X	Y	Z (m)	Periodo de datos	N° de datos	% de vacios
1	15066	PALIZADA	-100.09	19.50	2635	1958 - 2008	51	5.2
2	15070	PRESA BROCKMAN	-100.14	19.77	2929	1969 - 2011	43	13.7
3	15076	PRESA TEPETITLAN	-99.95	19.66	2564	1961 - 2010	50	3.3
4	16002	AGOSTITLAN CFE	-100.62	19.54	2520	1950 - 2006	57	6.1
5	16020	CIUDAD HIDALGO DGE	-100.55	19.69	2060	1959 - 2006	48	1.8
6	16045	EL TEMAZCAL	-100.95	19.65	2220	1965 - 2011	47	2.2
7	16058	JUNGAPEO	-100.49	19.46	1248	1940 - 1988	49	11.8
8	16061	LAGUNA DEL FRESNO	-100.41	19.81	2080	1947 - 2009	63	12.0
9	16071	AZUFRES	-100.65	19.77	2953	1964 - 1997	34	16.5
10	16096	PRESA MALPAIS	-100.87	19.82	1859	1944 - 2006	63	4.5
11	16097	PRESA PUCUATO	-100.68	19.62	2490	1950 - 2006	57	6.1
12	16099	PRESA TUXPAN CFE	-100.47	19.56	1750	1952 - 1995	44	9.3
13	16121	SENGUIO	-100.35	19.73	2260	1969 - 2007	39	17.8
14	16136	TZITZIO	-100.92	19.58	1565	1969 - 2011	43	5.7
15	16145	ZINAPECUARO	-100.82	19.86	1880	1923 - 2010	88	10.2
16	16152	CIUDAD HIDALGO SMN	-100.55	19.72	2327	1922 - 1988	67	2.6
17	16213	IRIMBO	-100.47	19.69	2180	1978 - 2007	30	16.2
18	16232	EL DEVANADOR	-100.82	19.38	1060	1982 - 2010	29	13.2
19	16235	HUAJUMBARO	-100.74	19.67	2285	1980 - 2006	27	14.8
20	16514	JARIPEO	-100.39	19.41	1880	1987 - 2006	20	12.2
21	16192	LA ENCARNACION	-100.48	19.65	1720	1974 - 2011	38	10.7

7.5.2 Homogeneidad o consistencia de datos

Toda serie temporal de precipitaciones debe ser homogénea y consistente. Esta evaluación se logra a través de pruebas estadísticas.

“La buena medición es vulnerable a distintos problemas que se pueden presentar, el operador no tomó el dato, el instrumento presento algún daño, entre muchos otros factores, y es por esto que en algunas ocasiones no se pueden hacer mediciones del fenómeno de precipitación” (Gutiérrez, 2012).

Evaluar la consistencia de los datos significa, evaluar la calidad y confiabilidad de la información que se va a procesar. Esta evaluación se realizó por medio de cuatro pruebas de consistencia:

1. Prueba de secuencias
2. Test de Helmert
3. Cramer
4. t de Student

Las primeras dos, son pruebas básicas que deben aplicarse como primera etapa. En segunda instancia tenemos la prueba de Cramer y t de student, éstas últimas son

pruebas más específicas que deben aplicarse en una segunda etapa solamente a las estaciones que no hayan resultado “homogéneas” en la primera etapa.

En la tabla 7.13 se muestran los resultados que se obtuvieron al aplicar las pruebas a las estaciones climatológicas seleccionadas para la zona en estudio.

La consistencia de los datos, también fue evaluada con el método de la curva masa doble. “Para determinar la consistencia se usa la técnica de la curva masa doble, que se basa en observaciones hechas en el sentido de que la precipitación acumulada medida para variaciones no es muy sensible a cambios importantes, debido a que muchos errores se compensan, mientras que la lluvia acumulada de una estación en particular se afecta demasiado en presencia de cambios importantes” (Aparicio, 1992).

Se hace una interpretación gráfica de los datos acumulados anuales de la estación, en la cual se determinará la consistencia contra los datos acumulados promedio de las demás estaciones y se determina su comportamiento, la tendencia deberá ser lineal para poder validar los datos de la estación, de lo contrario se desecharía la estación en estudio con sus datos correspondientes.

Tabla 7.13 Resultados de pruebas de consistencia aplicadas a las series de precipitación.

Código	Helmert	Secuencias	t student	Cramer
15066	Homogéneo	Homogéneo		
15070	Homogéneo	Homogéneo		
15076	Homogéneo	Homogéneo		
16002	Homogéneo	Homogéneo		
16020	Homogéneo	Homogéneo		
16045	Homogéneo	Homogéneo		
16058	Homogéneo	Homogéneo		
16061	Homogéneo	Homogéneo		
16071	Homogéneo	Homogéneo		
16192	Homogéneo	No homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16096	Homogéneo	Homogéneo		
16097	Homogéneo	Homogéneo		
16099	Homogéneo	Homogéneo		
16121	Homogéneo	Homogéneo		
16136	Homogéneo	Homogéneo		
16145	Homogéneo	Homogéneo		
16152	Homogéneo	Homogéneo		
16213	Homogéneo	Homogéneo		
16232	Homogéneo	Homogéneo		
16235	Homogéneo	Homogéneo		
16514	Homogéneo	Homogéneo		

Nota: La estación 16192, presentó problemas de homogeneidad con las pruebas básicas, por ello se aplicaron solamente para esa estación las pruebas de t Student y Cramer.

7.5.3 Independencia de las series de precipitación.

Para probar que una serie de precipitaciones realmente tiene la naturaleza que una serie de este tipo debe poseer, debemos evaluar su independencia en el tiempo.

Para evaluar esta prueba de independencia de la serie, se calcula el coeficiente de autocorrelación temporal “ r_k ” de la misma, y los límites de independencia temporal de Anderson (Anderson, 1941. Citado por Salas *et al.*, 1980).

El coeficiente de autocorrelación se calcula con la siguiente ecuación:

$$r_k(z) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (z_{t+k} - z)(z_t - z)}{\sum_{t=1}^N (z_t - z)^2} \quad (37)$$

Los límites de confianza, para el coeficiente de autocorrelación se pueden obtener como (Anderson, 1941):

$$r_k^i(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad (38)$$

La figura 7.16 se muestra el correlograma de una de las estaciones principales evaluadas.

Tabla 7.14 Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación para la estación meteorológica con clave 16020.

r(k)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.10188562	-0.2718151	-0.0403999	-0.0513319	0.11847947	-0.0194068	-0.1544812	0.03290751	0.08343545	-0.186207

Límites de Anderson									
0.3140439	0.3184974	0.3231498	0.3280164	0.3331140	0.3384615	0.3440800	0.3499929	0.3562267	0.3628113
-0.3785601	-0.3851641	-0.3921153	-0.3994450	-0.4071881	-0.4153846	-0.4240800	-0.4333262	-0.4431833	-0.4537204

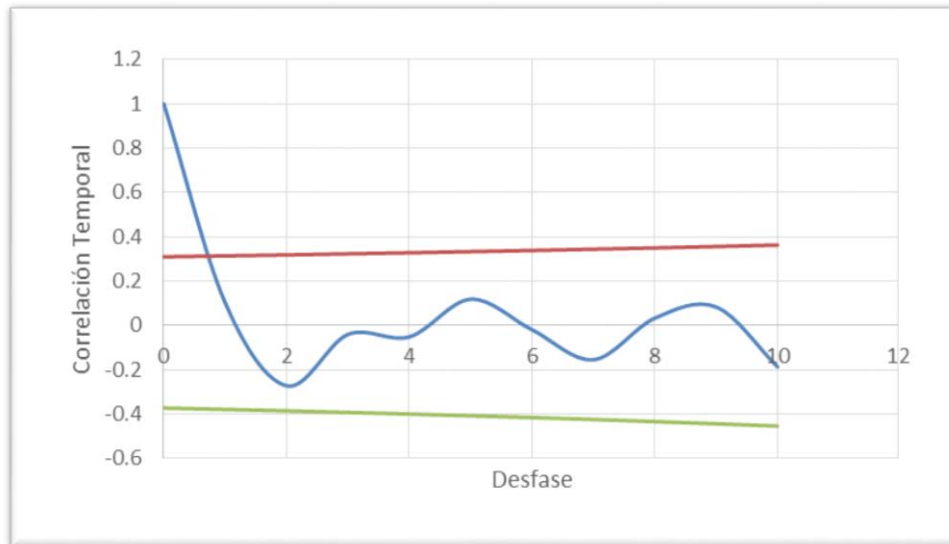


Figura 7.16 Correlograma de la estación con clave 16020, que muestra la independencia temporal de la serie al graficar su comportamiento dentro de los límites de Anderson.

Tabla 7.15 Resultados de la prueba de independencia de estaciones principales.

<u>Código</u>	<u>Anderson</u>
15066	Independiente
15070	Independiente
15076	Independiente
16002	Independiente
16020	Independiente
16045	Independiente
16058	Independiente
16061	Independiente
16071	Independiente
16192	Independiente
16096	Independiente
16097	Independiente
16099	Independiente
16121	Independiente
16136	Independiente
16145	Independiente
16152	Independiente
16213	Independiente
16232	Independiente
16235	Independiente
16514	Independiente

7.5.4 Estimación de datos faltantes de las series de precipitación

El llenado de datos solo permite llenar los vacíos con datos razonables consistentes con la estadística, estos métodos no reproducen los datos perdidos.

Cuanto menor sea la cantidad de datos faltantes para una serie histórica, se espera que los resultados presenten menos incertidumbre. Al agregar datos a la serie histórica se está agregando un porcentaje de incertidumbre, ya que los datos están siendo llenados y no representan lo que en realidad sucedió.

Dentro de los métodos propuestos para evaluar las estaciones que pueden servir para el llenado de otra serie, el más comúnmente utilizado en series de datos de precipitación, es determinar la correlación espacial de las estaciones cercanas frente a la estación a llenar.

Estos valores de correlación se presentan mediante una matriz, la cual se denomina matriz de correlación espacial. A través de ella es posible identificar las estaciones que presentan un valor de correlación alto mayor de 0.08 (Aparicio, 1992).

El siguiente paso fue elegir el método a emplear para llenar los datos faltantes de la serie. Existen algunos métodos para llevar a cabo este proceso. Hay métodos muy rigurosos y otros que consideran menos variables para llevar a cabo el llenado (Aranda, 1992).

El llenado de datos se realizó con el método del Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW). Previo al llenado, el método requiere obtener los estadísticos básicos de la serie original (sin llenado) y, la matriz de distancias euclidianas. (Detalles del método en anexo 3)

La distancia euclidiana es la distancia ordinaria deducida a partir del teorema de Pitágoras, para determinar esta distancia se utilizan las coordenadas de cada estación y su respectiva elevación con respecto a la otra estación. Obteniéndose por tanto una matriz de distancias euclidianas de las estaciones principales y secundarias.

Se realizó el llenado de 13 estaciones climatológicas, a las cuales se aplicaron los mismos estadísticos de análisis, para comprobar que las series llenas también cumplen con las características propias de una estación meteorológica.

7.5.5 Evaluación de estadísticos básicos

Los datos de las series originales fueron evaluados antes de que se les aplicara cualquier tipo de tratamiento a los datos. Cuando se habla de estadísticos básicos, se hace alusión a:

- Media
- Desviación estándar
- Sesgo

Cuando se trata de series mensuales, se calculan las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo para cada uno de los meses. Se utilizan las siguientes formulas:

$$\bar{Q}_\tau = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,\tau}}{N} \quad (39)$$

$$s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^2}{N-1}} \quad (40)$$

$$g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)s_\tau^3} \quad (41)$$

Donde:

\bar{Q}_τ : Media mensual de los caudales del mes τ .

$Q_{v,\tau}$: Caudal del mes τ del año v ($v=1, \dots, N$).

N : Número total de años.

s_τ : Desviación típica mensual del mes τ .

g_τ : Coeficiente de sesgo mensual del mes τ .

Estos mismos estadísticos deben ser evaluados para la serie después de haber sido completadas, esto permite comparar qué tanto ha cambiado la serie y puede hacerse un análisis más detallados a cerca de la incertidumbre que se está generando al incorporar esos datos no medidos a la serie.

La tabla 7.16 muestra la comparación de los estadísticos de una misma serie de precipitación antes y después de haber sido llenada.

Tabla 7.16 Comparativa de estadísticos básicos para la estación 16020, antes y después del llenado de datos.

Estadístico	Antes	Después
Media	802.30	825.44
Desviación estándar	201.47	161.15
Sesgo	-1.03	0.30

7.6 Información hidrométrica o de gasto

En la zona de estudio se encuentra funcionando dos estaciones hidrométricas. La primera con clave 18459 cuyo nombre es "Río Grande", se encuentra situada dentro del municipio de Tuxpan sobre el río Grande (río Tuxpan).

La segunda estación tiene la clave 18460 "Río Chiquito" se encuentra sobre el río Chiquito o Anganguero a 400 m aguas arriba de su confluencia al río Tuxpan.

Tabla 7.17 Tabla resumen de estaciones hidrométricas que está dentro de la cuenca del río Tuxpan.

Clave	Nombre	Coordenadas		Descripción
		Latitud	Longitud	
18459	Río Chiquito	19° 34' 25"	100° 27' 45"	Sobre corriente del río Anganguero
18460	Río Grande	19° 34' 40"	100° 27' 50"	Sobre corriente del río Tuxpan



7.6.1 Evaluar dependencia de la serie histórica

Para que una serie de gastos pueda ser considerada como tal, debe cumplir con la característica de ser una serie **dependiente**. Esta dependencia puede probarse con el método descrito para las estaciones meteorológicas a través de los límites de Anderson (Anderson, 1941).

Tabla 7.18 Límites de Anderson y coeficiente de auto-correlación de la estación de gasto 18459.

k	LIM.INF	LIM.SUP	Est. 18459
0	-0.157	0.145	1
1	-0.157	0.145	0.525
2	-0.158	0.146	0.376
3	-0.158	0.146	0.333
4	-0.159	0.146	0.281
5	-0.159	0.147	0.185
6	-0.16	0.147	0.229
7	-0.16	0.148	0.311
8	-0.161	0.148	0.258
9	-0.161	0.149	0.26
10	-0.162	0.149	0.293

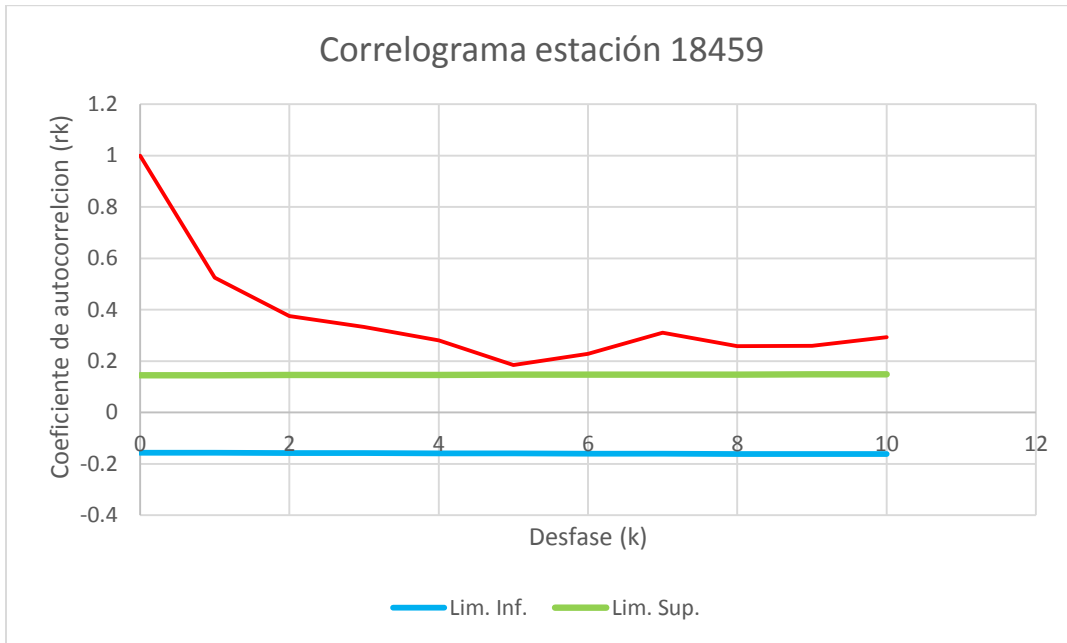


Figura 7.18 Correlograma de la estación hidrométrica 18459. Puede observarse la dependencia temporal de la serie histórica, al quedar graficada fuera de los límites de Anderson.

El correlograma de la segunda estación de gasto, se muestra en la figura 7.19.

Tabla 7.19 Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación de la estación hidrométrica 18460.

k	LIM.INF	LIM.SUP	Est. 18460
0	-0.082	0.079	1
1	-0.083	0.079	0.712
2	-0.083	0.079	0.54
3	-0.083	0.079	0.413
4	-0.083	0.079	0.298
5	-0.083	0.079	0.221
6	-0.083	0.079	0.199
7	-0.083	0.08	0.181
8	-0.083	0.08	0.15
9	-0.083	0.08	0.112
10	-0.083	0.08	0.082

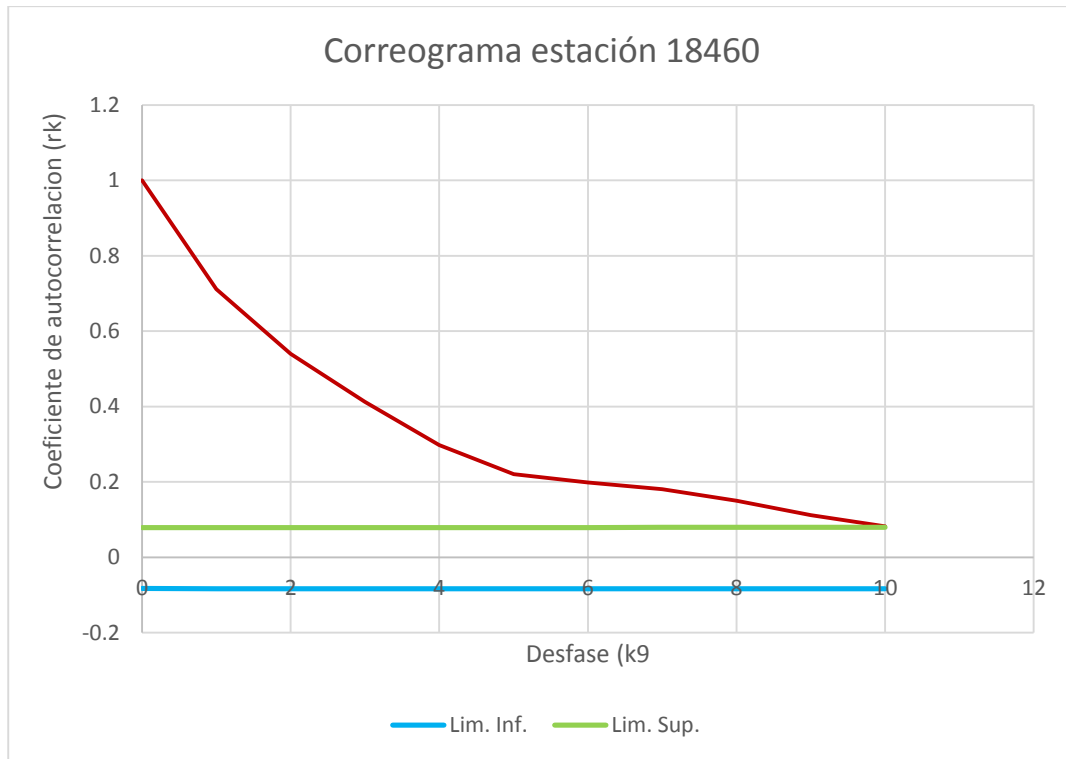


Figura 7.19 Correograma de la estación hidrométrica 18460. Muestra la dependencia de la serie de gasto.

7.7 Modelación hidrológica

En este apartado se describe el proceso que se siguió para la modelación de los escurrimientos en la zona de estudio.

La modelación de los escurrimientos para esta cuenca se realiza bajo dos esquemas: el primero es utilizando herramientas informáticas que han sido desarrolladas por la Universidad Politécnica de Valencia y; el segundo: utilizando la metodología propuesta por la Comisión Nacional del Agua para México. Sin embargo, no se pierda de vista que se hablará de dos modelos conceptuales diferentes para la obtención de los escurrimientos, se trata de los modelos Témez y HBV.

Haciendo referencia a las herramientas informáticas que se utilizarán, tenemos dos diferentes: EVALHID y PATRICAL. La primera será utilizada para los modelos de Témez y HBV; mientras que la segunda se utilizará para aplicar solamente el modelo de Témez. La diferencia principal entre ambas herramientas es la manera en que

aplican las ecuaciones del modelo de Témez. El módulo PATRICAL es un modelo distribuido, mientras que EVALHID es del tipo agregado y puede funcionar como cuasi distribuido (Paredes, 2004).

7.7.1 Modelación hidrológica con la herramienta EVALHID

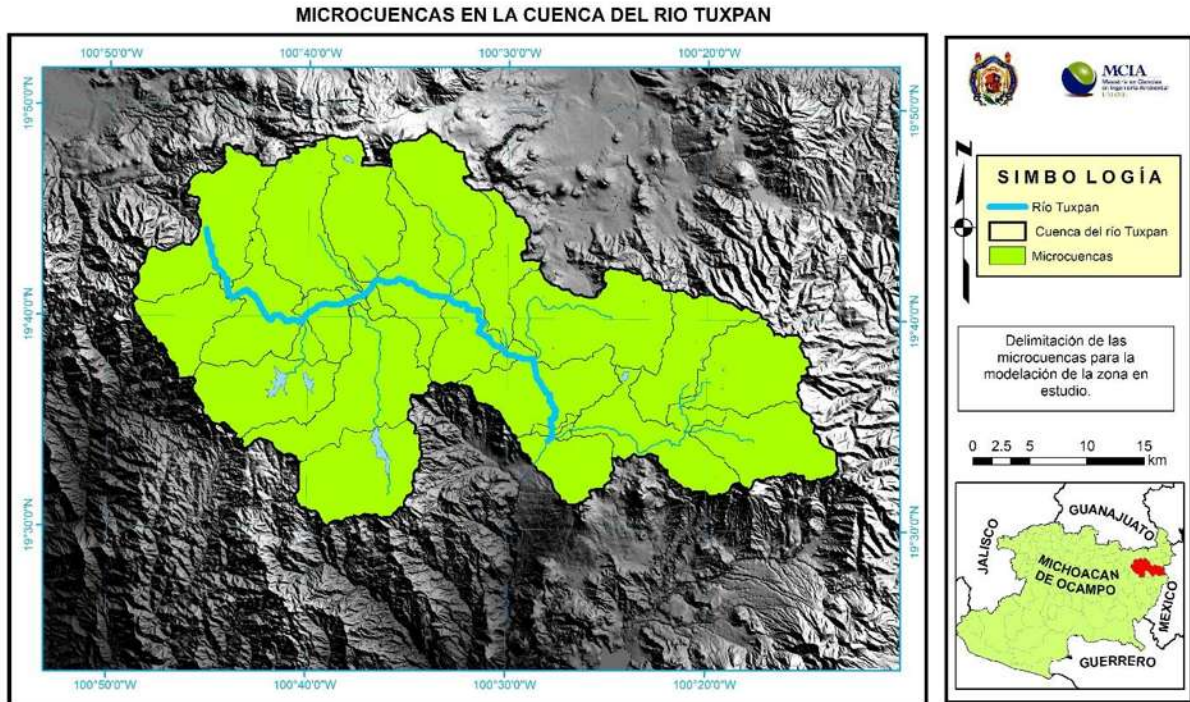
La modelación con la herramienta EVALHID se realiza haciendo uso de dos modelos de simulación hidrológica distintos, HBV y Témez, por lo que a continuación se hace la descripción de la metodología que se sigue en cada uno de los procesos.

7.7.1.1 Modelo de Témez

La herramienta EVALHID permite la modelación del ciclo hidrológico (utilizando las ecuaciones del modelo de Témez) de manera agregada, y dependiendo de la manera en que se manipulen los datos, puede llegar a funcionar como cuasi distribuido. EVALHID realiza una valoración general de la cuenca sin considerar la distribución espacial de las variables y de los parámetros que intervienen en los cálculos, valores que son sustituidos por valores medios, es por ello que dicho modelo se limita para cuencas pequeñas y de tamaño medio, en donde puede existir cierta homogeneidad en clima, edafología y geología.

El modelo de Témez puede funcionar para cuencas de gran tamaño realizando subdivisiones en subcuencas y así operar como un modelo semidistribuido (Murillo, 2011).

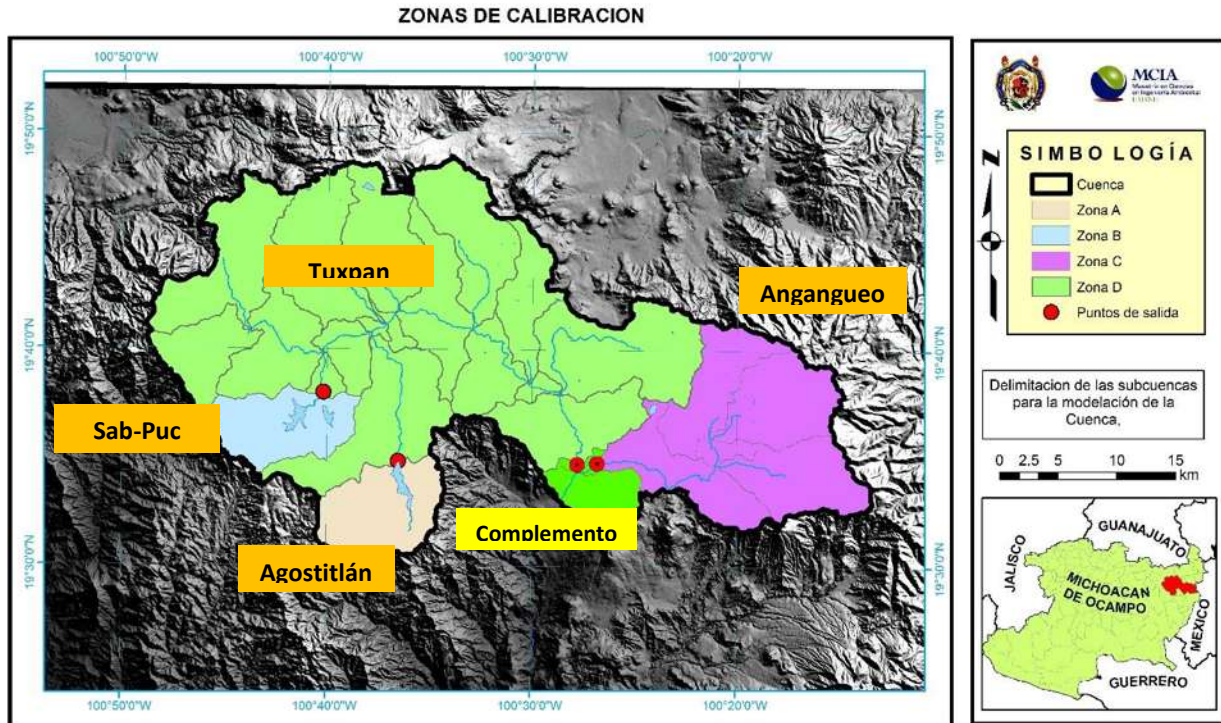
Para aplicar el modelo de Témez a la cuenca del río Tuxpan utilizando esta herramienta informática, es necesario determinar las microcuencas de la zona en estudio, mismas que están definidas por la red de drenaje y la topografía de sitio.



Definidas las microcuencas, se establecieron los puntos de aforo que se tienen en la zona, mismos que definen los puntos de calibración para el modelo. Par el caso de la cuenca del río Tuxpan, se tienen dos estaciones hidrométricas con claves 18459 y 18460 y, tres presas, dos de éstas confluyen al mismo río, por lo que se modelaran como una sola.

Estos puntos definen las zonas de calibración del modelo, para este caso al tenerse cuatro puntos de aforo, se definieron también cuatro subcuencas o zonas de calibración (Fig. 7.21).

Posteriormente se definen las zonas de influencia que tienen cada una de estaciones climatológicas sobre la cuenca, esta determinación se hace a través de los polígonos de Thiessen (Fig. 7.22). Esto permitirá generar las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración de cada microcuenca para alimentar el modelo.



Conociendo las áreas de influencia de cada estación climatológica y teniendo establecidas las cuatro zonas de calibración, se determina que estación climatológica tiene influencia sobre cada una de las microcuencas de modelación. Cuando una microcuenca está afectada por dos o más estaciones, se construye una *estación ficticia* en el centroide de gravedad de la microcuenca, la cual se origina con los datos de las estaciones reales que influyen sobre la superficie de la misma. El método para la construcción de las estaciones ficticias fue el mismo método utilizado para la estimación de datos faltantes en las series climatológicas originales (ver anexo 3), es decir, el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, el cual define un peso distinto para cada estación involucrada dependiendo de la influencia que ésta ejerza sobre la zona de estudio.

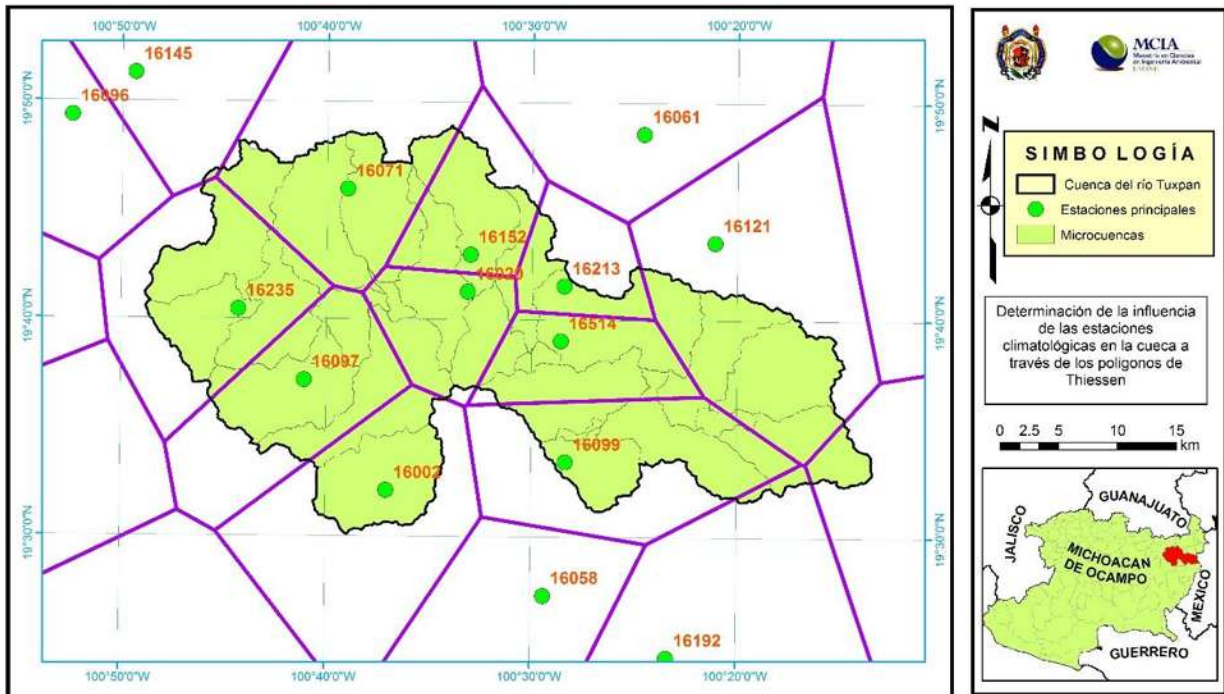


Figura 7.22 Polígonos de Thiessen para la cuenca de río Tuxpan utilizando las 13 estaciones climatológicas principales.

Habiendo definido las zonas de calibración del modelo y los datos climatológicos para cada una de ellas, se procede con la calibración y validación del modelo.

7.7.1.1.1 Calibración

Para la etapa de calibración, se utiliza el algoritmo evolutivo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method desarrollado por The University of Arizona), (Duan *et al.*, 1994). Este algoritmo ha sido adecuado para ser utilizado con los datos que genera EVALHID, sin embargo éste se encuentra programado en una hoja de cálculo separada del programa.

El algoritmo SCE funciona a partir de una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios, iniciando en diferentes puntos de búsqueda (individuos) los cuales se organizan en equipos (complex) y la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación) en donde además existe una mezcla entre los equipos (Casas, 2013).

➤ **Indicadores de ajuste**

Para la evaluación de la calidad o certeza con que se presentan las modelaciones respecto a los datos reales observados, se hace uso de un grupo de indicadores de ajuste. A continuación se presentan las expresiones matemáticas que permiten obtenerlos y los rangos bajo los cuales se clasifican las modelaciones.

Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS). Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - Y_{i\text{ sim}})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - \bar{Y}_{\text{ obs}})^2 \right]} \quad (42)$$

En la ecuación anterior $Y_{i\text{ obs}}$ representa el i -ésimo valor observado que está siendo evaluado, $Y_{i\text{ sim}}$ compone el i -ésimo valor simulado que está siendo evaluado, $\bar{Y}_{\text{ obs}}$ es la media de los datos observados y, n es el número total de observaciones (Moriasi *et al.*, 2007).

Tabla 7.20 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi *et al.*, 2007).

Calidad de ajuste	NSE ó E
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$

Nash-Sutcliffe modificado. Es la transformación logarítmica del flujo ($\ln NSE$); este indicador da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Mediante esta transformación logarítmica, los picos se disminuyen y los valores más bajos se mantienen. El índice Nash-Sutcliffe modificado presenta mayor sensibilidad a las sobrevaloraciones y a las infravaloraciones del modelo.

$$\ln NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{ obs}}) - \ln(Y_{i\text{ sim}}))^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{ obs}}) - \ln(\bar{Y}_{\text{ obs}}))^2 \right]} \quad (43)$$

Tabla 7.21 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007).

Calidad de ajuste	NSE
Muy buena	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$
Buena	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$
No satisfactoria	$\text{NSE} \leq 0.50$

El coeficiente de Correlación de Pearson (r^2) mide la covariabilidad de los valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor de este coeficiente varía entre -1 y 1 . Cuando el coeficiente r^2 toma el valor de 1 se tiene una correlación completa positiva, es decir, todos los datos describen una línea recta con pendiente positiva. El coeficiente de correlación de Pearson se obtiene con la ecuación (44).

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (44)$$

Tabla 7.22 Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.

Calidad de ajuste	r^2
Excelente	$0.90 < r^2 \leq 1.00$
Muy buena	$0.75 < r^2 \leq 0.89$
Buena	$0.50 < r^2 \leq 0.74$
No satisfactoria	$r^2 \leq 0.50$

Los indicadores mencionados anteriormente son los que se encuentran sugeridos en el calibrador de la herramienta EVALHID, sin embargo esto no limita el uso de otros indicadores que permitan evaluar la calidad de las simulaciones obtenidas del modelo respecto a los datos medios.

Teniendo establecida la manera en que se evaluarán las modelaciones para determinar si la calibración se encuentra dentro de los rangos aceptables, se procedió con la primera calibración.

✓ **Subcuenca del río Anganguero**

La primera zona de calibración, la “zona D” se refiere a la subcuenca del río Anganguero. Tiene un área de influencia de 239 km², cuyo punto de calibración es la estación hidrométrica 18460. Es importante mencionar que esta subcuenca de modelación se encuentra a régimen natural.

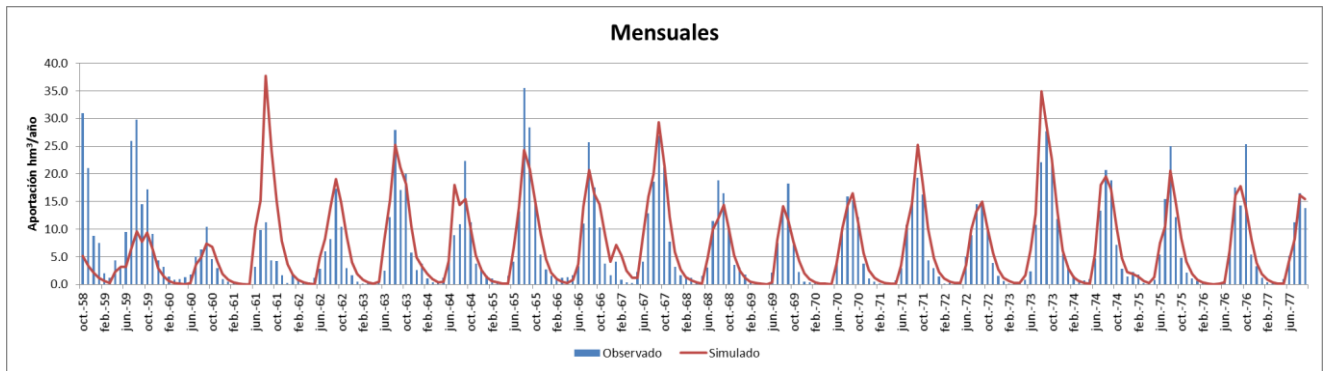


Figura 7.23 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.

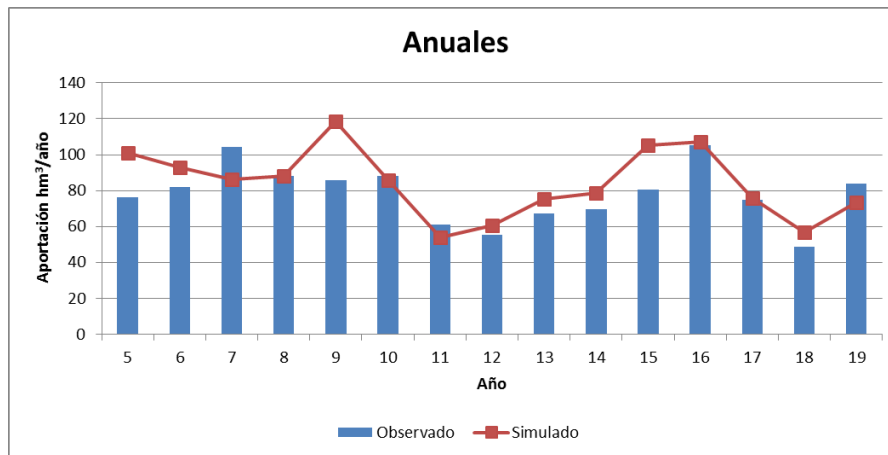


Figura 7.24 resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.

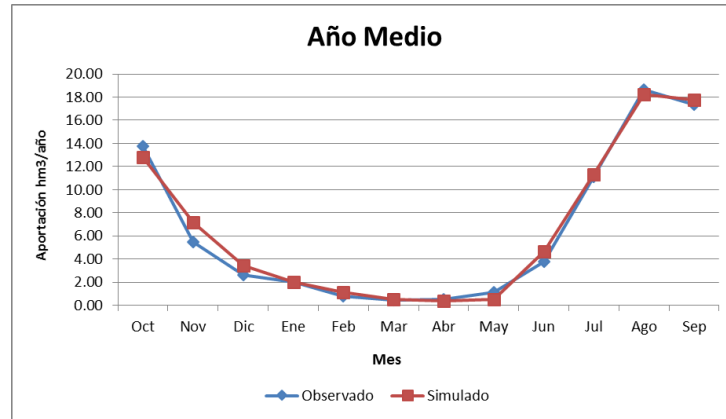


Figura 7.25 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Anganguo.

✓ **Subcuenca de la presa Agostitlán**

La segunda zona para calibrar es la que corresponde a la presa Agostitlán, comúnmente conocida como Mata de Pinos, cuyo punto de calibración son los registros de las entradas mensuales a la presa.

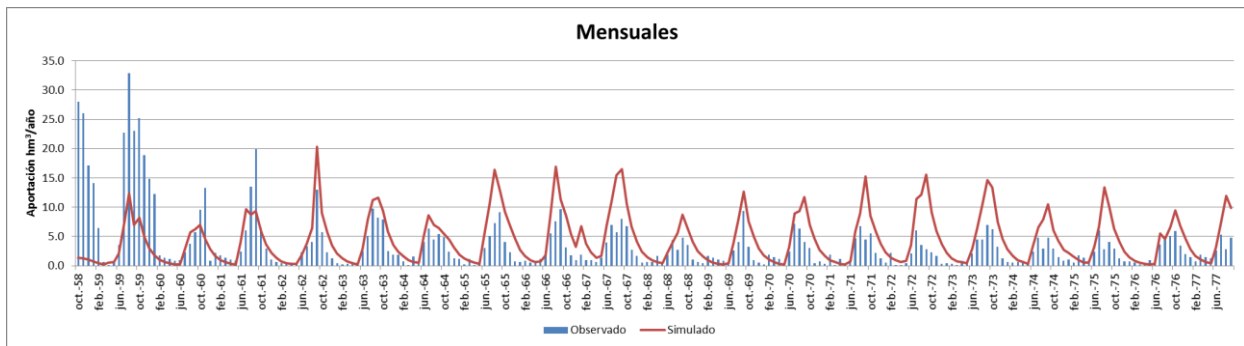


Figura 7.26 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.

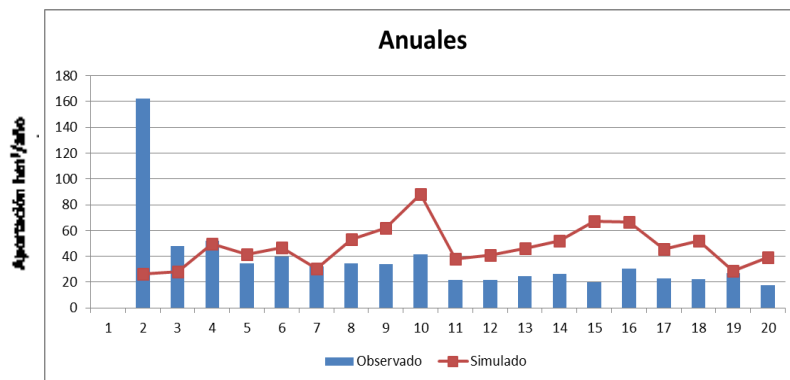


Figura 7.27 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.

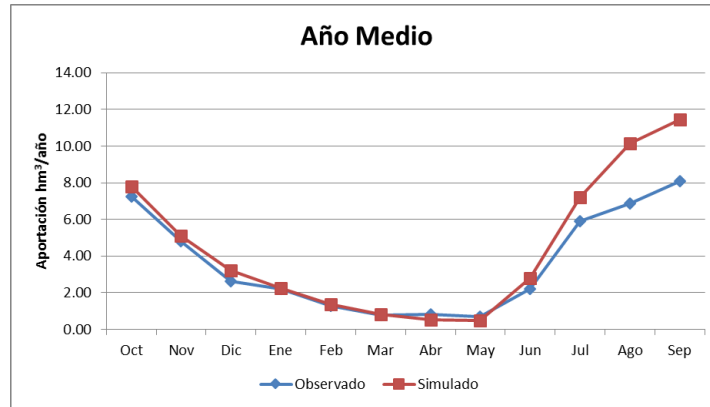


Figura 7.28 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán.

✓ **Subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuat**

La tercera zona de calibración se refiere a la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuat. El punto de calibración es la suma de las entradas en ambas presas, ya que como puede apreciarse en esquemas anteriores, las salidas de la presa confluyen al mismo río casi inmediatamente después de la cortina. El área de calibración es de 66 km².

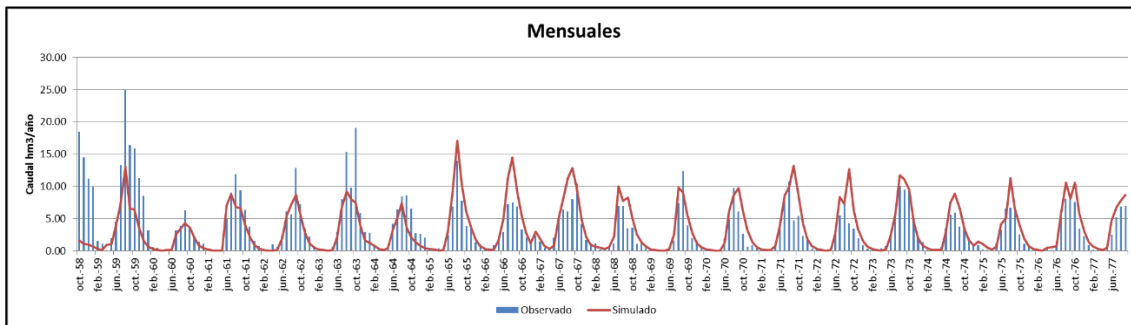


Figura 7.29 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuat.

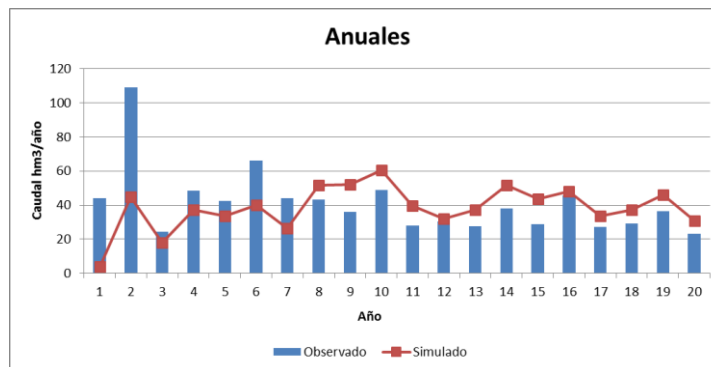


Figura 7.30 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuat.

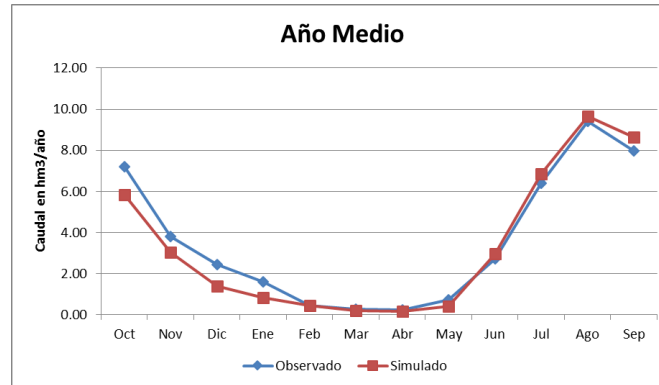


Figura 7.31 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucúato.

✓ Subcuenca del río Tuxpan

La cuarta zona de calibración se refiere a la zona D, se trata de la subcuenca del río Tuxpan. Tiene un área de influencia de 758 km². El punto de calibración es la estación hidrométrica 18459. Esta estación está afectada por extracciones y retornos que se dan producto de los usos que se tienen en la cuenca, principalmente del distrito de riego. Por lo que para lograr su calibración se realizó una restitución a régimen natural del punto de calibración.

7.7.1.1.2 Restitución a régimen natural

La restitución a régimen natural es un proceso que corresponde a la estimación de los caudales naturales en un cauce a partir de los caudales alterados, que son los que pueden observarse y medirse.

Desde el punto de vista conceptual, la restitución a régimen natural de los caudales en un río no ofrece dificultad alguna. De hecho, es poco frecuente encontrar alguna explicación en textos especializados en hidrología.

Para calcular el caudal en cada periodo, bastaría con añadir a los caudales aforados en el punto del río a restituir, los caudales derivados a través de tomas efectuadas en el tramos superior y los detraídos por extracción en los acuíferos, restar

los caudales incorporados por vertidos a través de otras cuencas o alimentación subterránea debida a recarga no natural del acuífero.

La ecuación general para la restitución a régimen natural es la siguiente:

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \pm S \quad (45)$$

Donde:

N = Caudal a régimen natural

A = Caudal aforado

T = Caudal derivado o trasvasado aguas arriba

B = Caudal detraído por bombeo de acuíferos

V = Retornos de aguas arriba

Q = Caudal de trasvase de otras cuencas

R = Caudal aportado por recarga en acuíferos

E = Caudal evaporado en embalses

S = Caudal almacenado o liberado en embalses

Cada caso de restitución a régimen natural es un planteamiento diferente, ya que hay que conocer cómo funciona el sistema de recursos hídricos para poder ejecutar las sumas y restas adecuadas en los puntos de balance correctos.

A continuación se muestra un esquema general de las alteraciones antropogénicas que suceden en la cuenca del río Tuxpan.

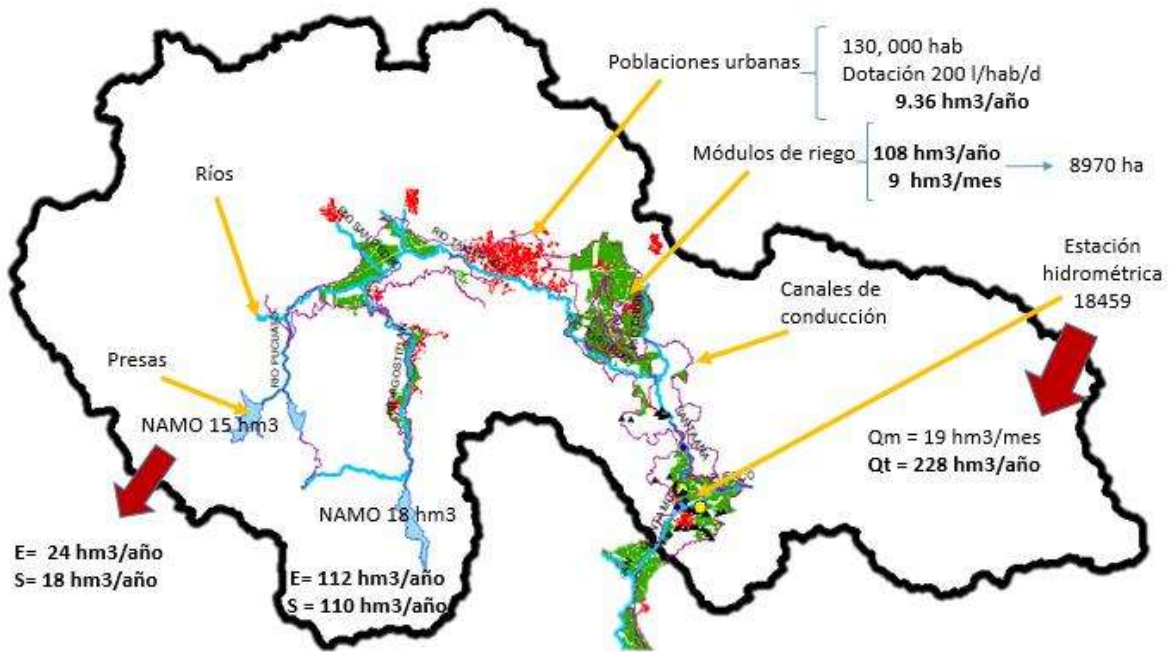


Figura 7.32 Afectaciones antropogénicas en la estación hidrométrica 18459.

De acuerdo con el esquema mostrado en la imagen anterior, se observa que para llevar a cabo la restitución a régimen natural de esta cuenca fue necesario sumar a los caudales aforados por la estación hidrométrica 18459, los volúmenes de agua que se otorgan a las poblaciones y al distrito de riego y, restar los volúmenes que retornan de estos sectores, considerando que un 80% del agua que se otorga a las poblaciones urbanas es regresada al río como agua servida y, que del 100% que se otorga a los distritos de riego, un 20% es retornado al río. Finalmente también fueron considerados los volúmenes almacenados en las presas. La restitución a régimen natural de este cauce se hizo a escala mensual.

Una vez restituido el punto de interés, es posible llevar a cabo la calibración de la subcuenca del río Tuxpan, cuyos gráficos se muestran a continuación.

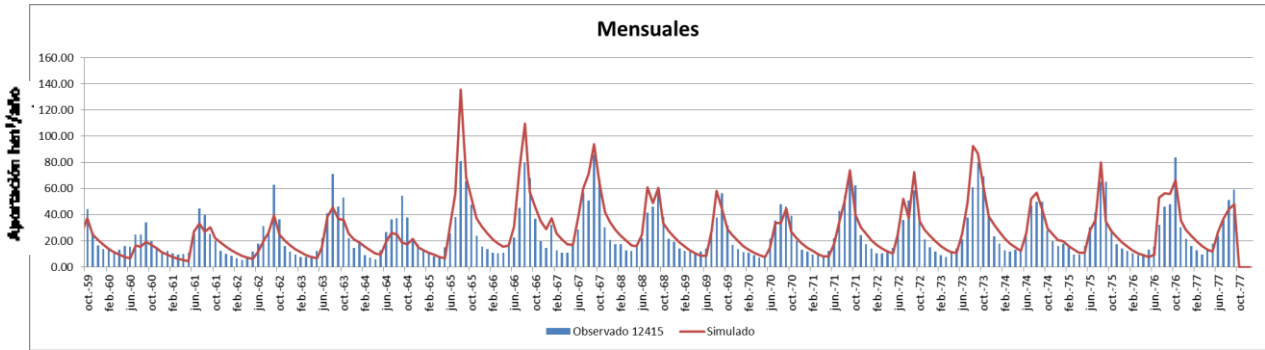


Figura 7.33 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.

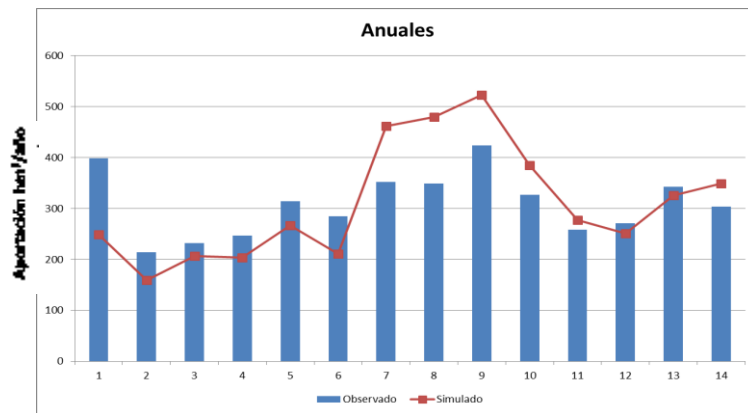


Figura 7.34 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.

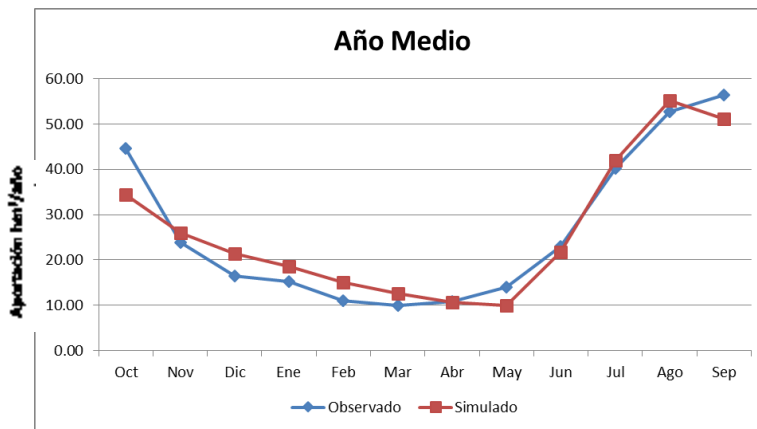


Figura 7.35 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la estación hidrométrica 18459. Tuxpan.

A continuación se muestra una tabla resumen, que permite evaluar a través de los indicadores de ajuste descritos anteriormente, la calidad de las modelaciones que se tiene en la etapa de calibración de acuerdo con los rangos establecidos.

Tabla 7.23 Rangos para la evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan (Moriasi et al., 2007).

Calidad de ajuste	NSE ó E	PBIAS	RSR
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

Tabla 7.24 Parámetros e indicadores de ajuste de las zonas modeladas.

Subcuenca	Parámetros				Indicadores de ajuste		
	Hmáx	C	Imáx	α	PBIAS	NSE	RSR
Anganguero	194	0.20	400	0.77	0.36	0.73	0.52
Sab-Puc	242	0.20	400	0.87	-7.85	0.66	0.58
Agostitlán	499	0.30	230	0.64	-14.67	0.82	0.42
Tuxpan	312	0.30	262	0.20	-5.76	0.71	0.54

De acuerdo a los valores que se muestran en las tablas anteriores, se puede observar que las calibraciones resultaron buenas o muy buenas, con lo que se concluye que el modelo de Témez, utilizando la herramienta EVALHID, es aceptado.

7.7.1.1.3 Modelación de los escurrimientos

Una vez calibrado y validado el modelo, se procede a la simulación de los escurrimientos para el periodo histórico de datos del año 1952 al año 2010.

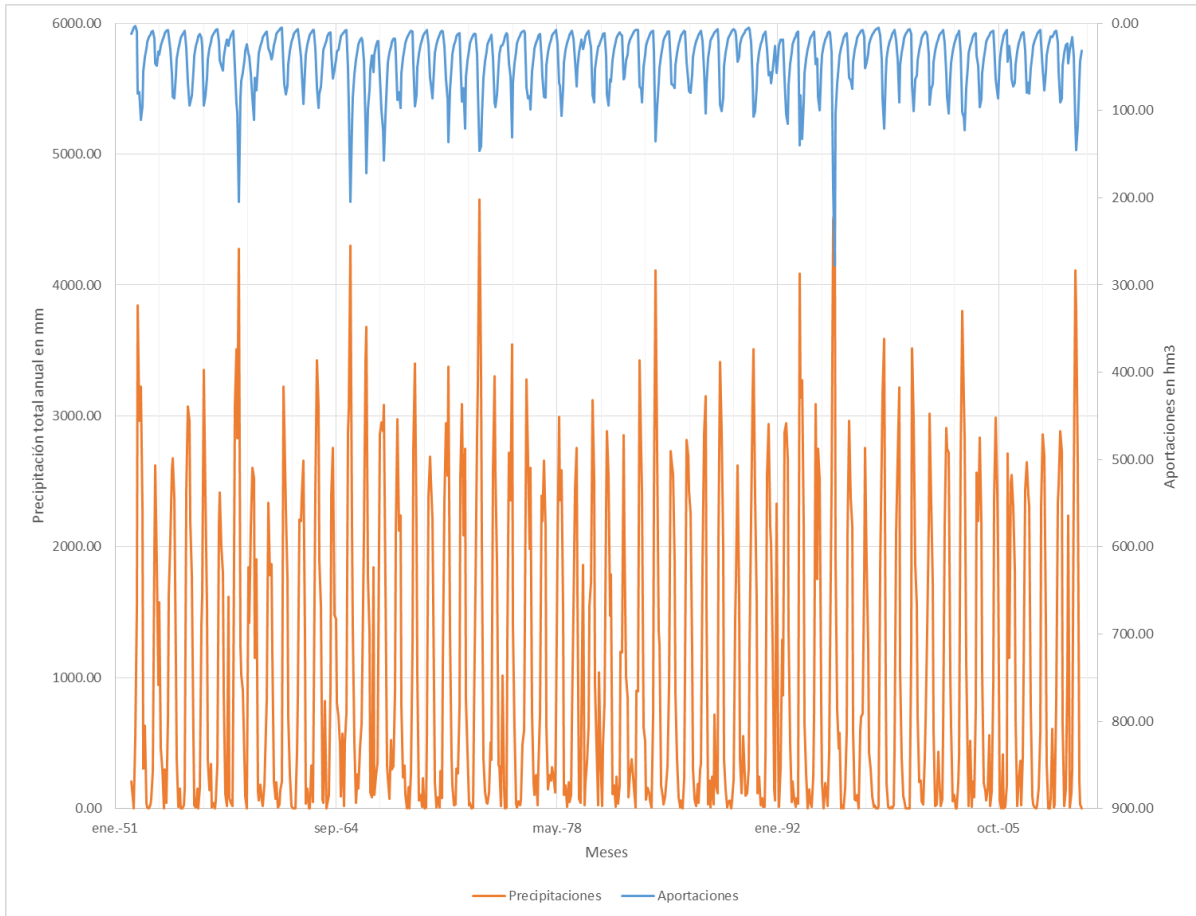


Figura 7.36 Comportamiento de las precipitaciones y resultados de la simulación de los escurrimientos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de Témex.

Como resultado obtenemos el balance hidrológico de la cuenca para dicho periodo. Del balance podemos desglosar las aportaciones y entender que pasa con cada uno de los elementos del ciclo del agua en el modelo. De esta manera se puede llegar a conclusiones concretas para cada variable en el ciclo.

Tabla 7.25 Distribución de la precipitación en el ciclo del agua simulado por el modelo de Témex para el periodo de 1952-2010.

Variables	mm/mes	hm ³ /año	%
Precipitación	85.5	1252.0	
ET Potencial	62.0	877.2	
ET Real	53.6	769.7	61
Infiltración	23.0	345.0	28
Escurrimiento Sup	8.8	135.2	11
Escurrimiento Subt	22.9	343.6	
APORTACIÓN	31.7	478.8	100.0

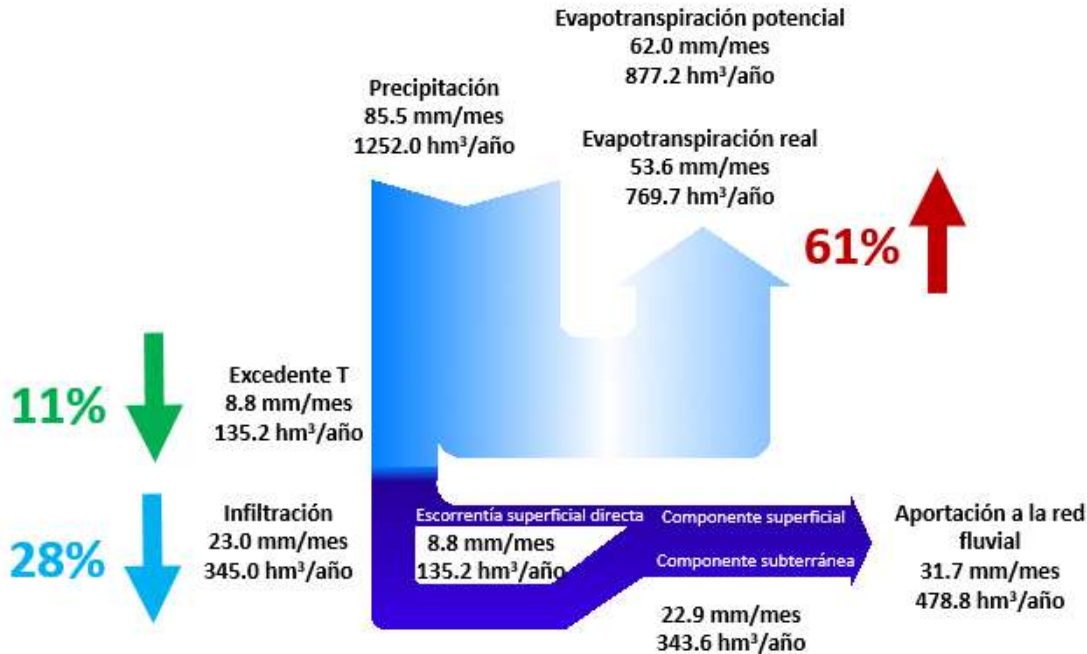


Figura 7.37 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de Témez.

7.7.1.2 Modelo HBV

El modelo HBV se encuentra programado también dentro de la herramienta EVALHID. Es un modelo considerado con bajo número de parámetros, ha sido ampliamente probado en países Europeos y se han obtenido buenos resultados.

Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escorrentía empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI).

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual.

Para el caso de estudio en la cuenca del río Tuxpan, el modelo se ejecuta a escala mensual, y se omite el módulo de nieve, excluyendo también los parámetros que controlan esta parte del modelo.

7.7.1.2.1 Calibración

✓ Subcuenca del río Anganguao

La subcuenca del río Anganguao tiene una superficie total de 239 km², los caudales se consideran a régimen natural al no existir alteraciones importantes a lo largo del cauce.

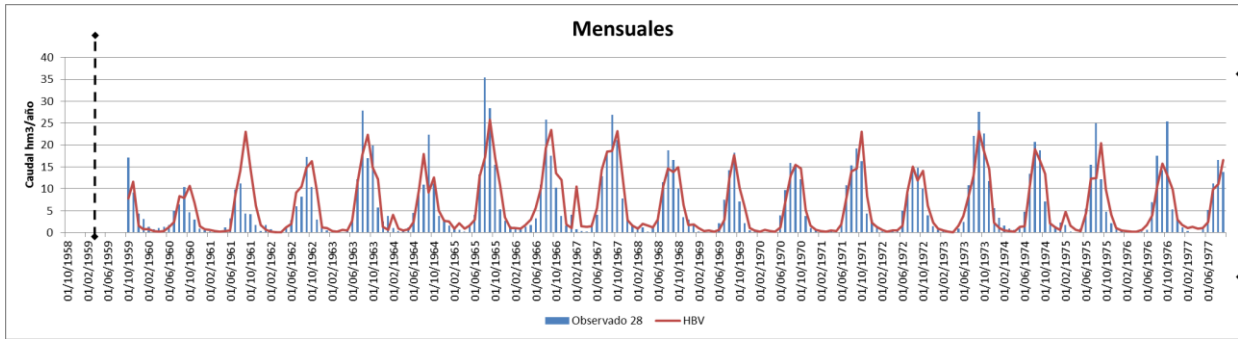


Figura 7.38 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguao con el modelo HBV.

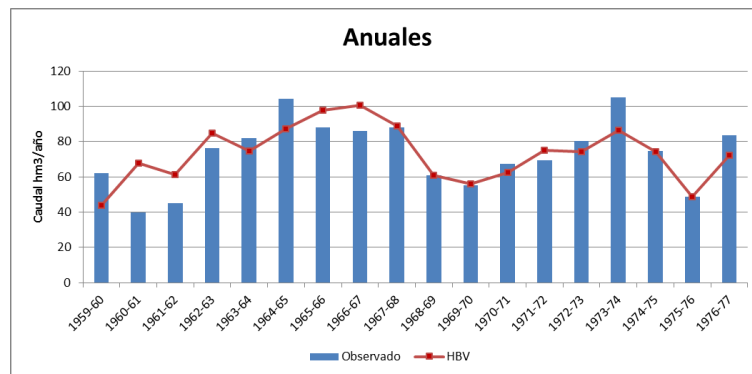


Figura 7.39 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguao con el modelo HBV.

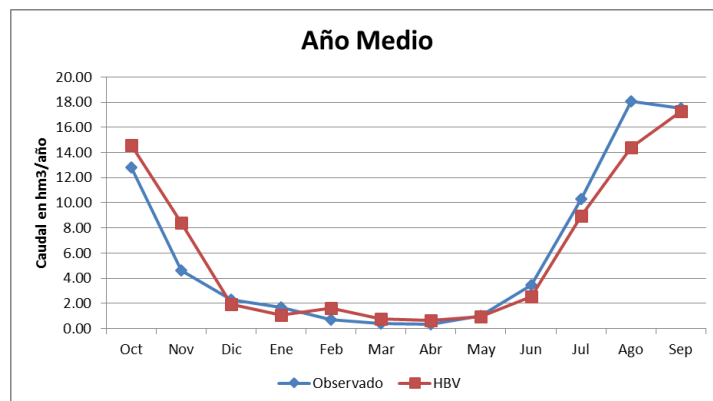


Figura 7.40 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Anganguao con el modelo HBV.

✓ Subcuenca de la presa Agostitlán.

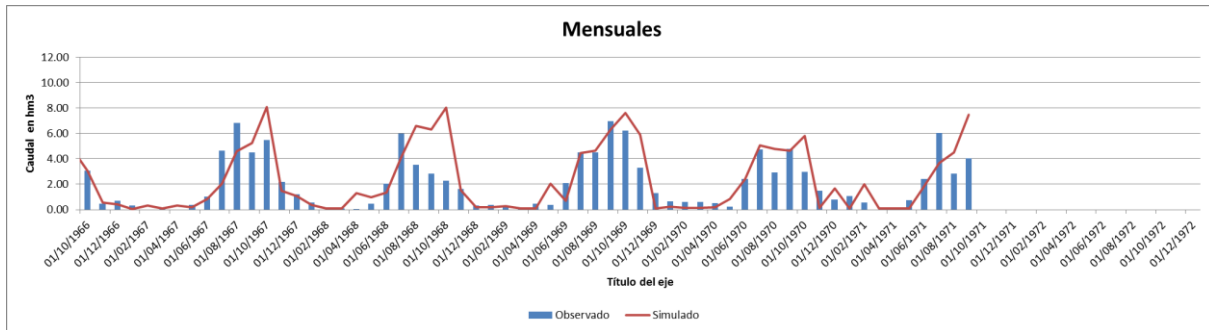


Figura 7.41 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV.

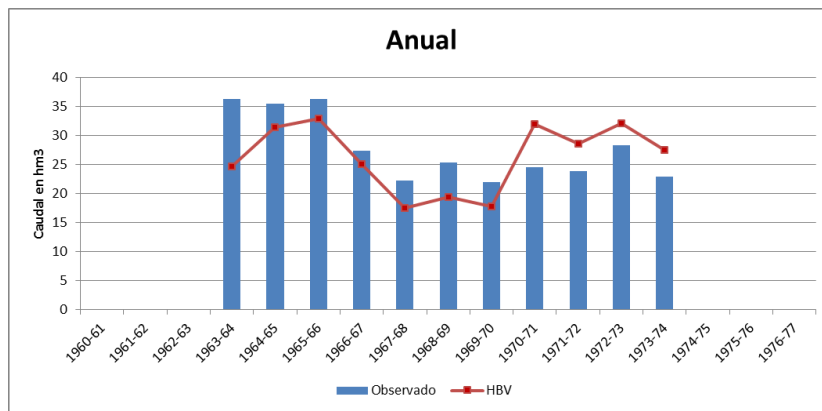


Figura 7.42 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV.

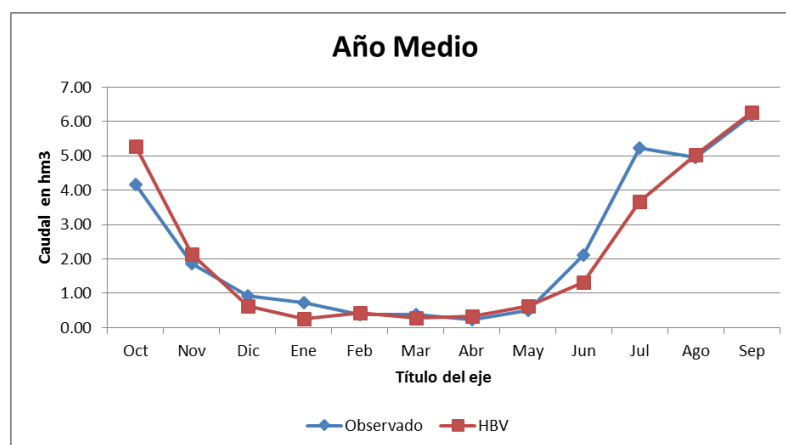


Figura 7.43 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de la presa Agostitlán con el modelo HBV.

✓ Subcuenca de las presas Sabaneta-Pucuato

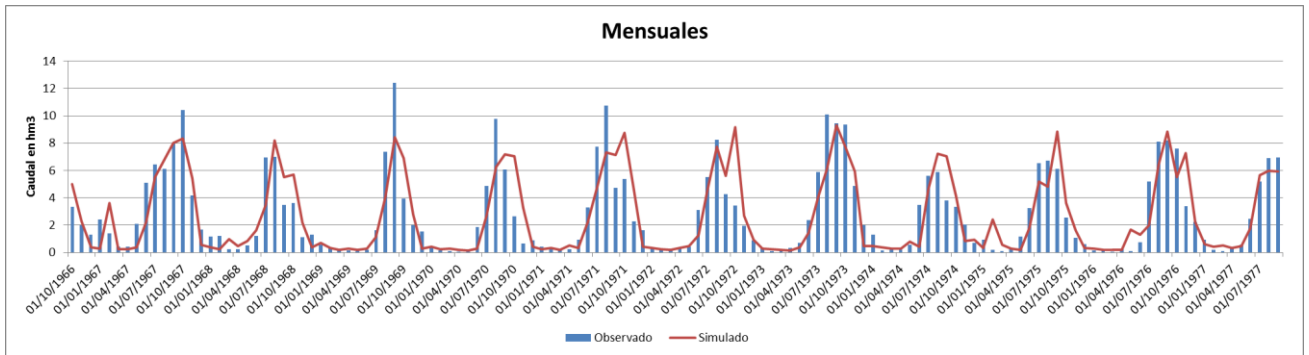


Figura 7.44 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV.

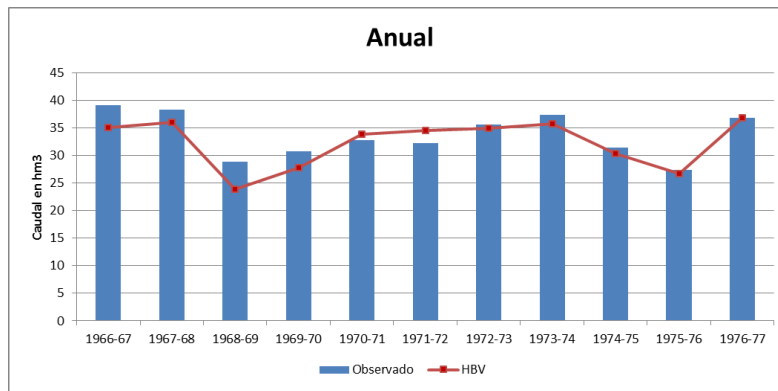


Figura 7.45 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV.

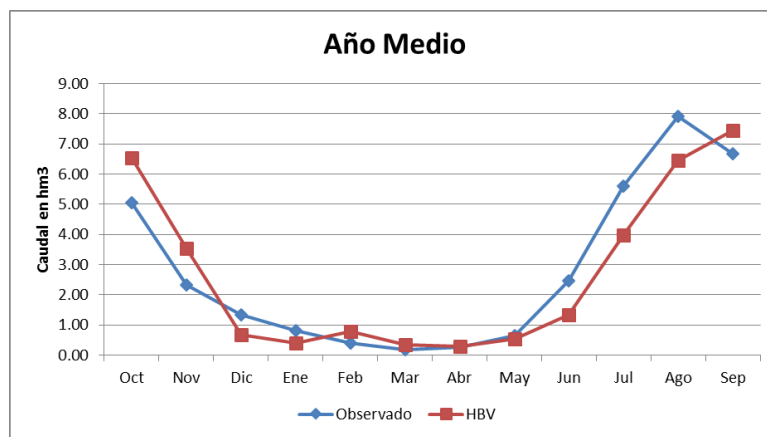


Figura 7.46 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuato con el modelo HBV.

✓ **Subcuenca del río Tuxpan**

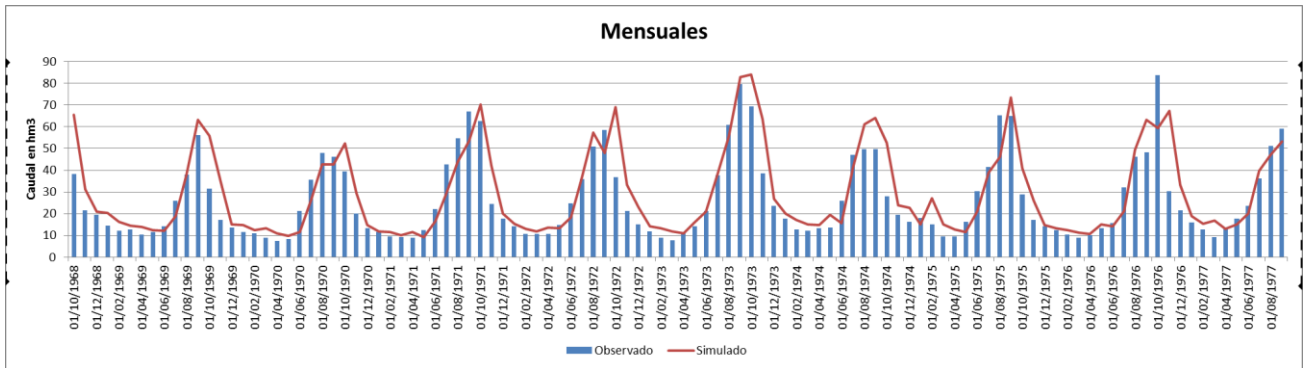


Figura 7.47 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV.

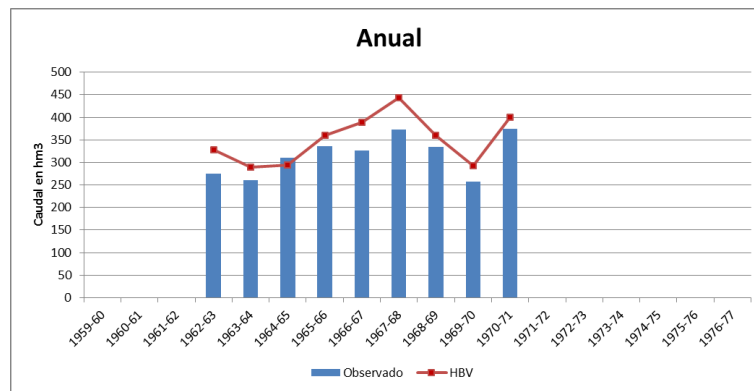


Figura 7.48 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV.

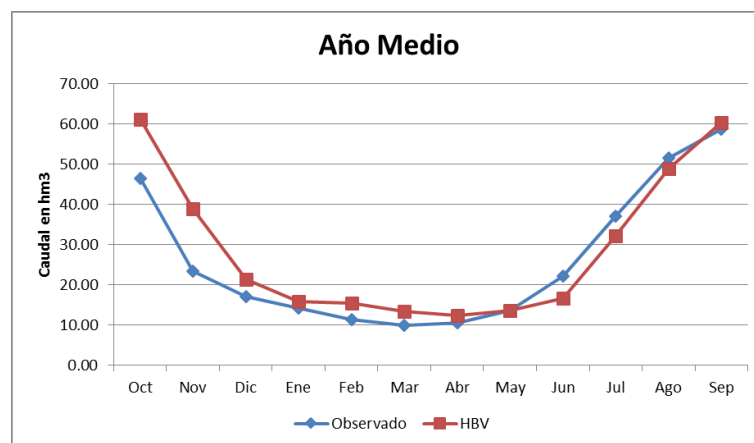


Figura 7.49 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan con el modelo HBV.

Los parámetros de calibración que se obtuvieron para cada subcuenca, son los que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 7.26 Parámetros de calibración.

SUBCUENCA	P A R Á M E T R O S									
	Beta	FC	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc	TT	DD
Agostitlán	1.0021	900.0	265.7	10.445	0.422	0.202	0.0002	0.657	0.000	40.718
Anganguero	1.0145	715.3	610.4	28.043	0.320	0.300	0.000	0.3035	0.000	0.039
Sabaneta-Pucuato	1.0023	676.5	650.0	28.850	0.400	0.198	0.0004	0.400	0.587	99.915
Tuxpán	1.0038	900.0	263.4	8.890	0.360	0.260	0.0793	0.370	0.000	57.009

✓ Indicadores de ajuste

Para evaluar la calidad de las calibraciones con el modelo HBV, se utilizaron los mismos indicadores que se usaron para el modelo de Témez, esto es con la finalidad de poder comparar los resultados entre ellos.

Tabla 7.27 Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan (Moriasi et al., 2007).

Calidad de ajuste	NSE ó E	PBIAS	RSR
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

Tabla 7.28 Indicadores de ajuste.

Subcuenca	Indicadores de ajuste		
	PBIAS	NSE	RSR
Agostitlán	5.13	0.67	0.58
Anganguero	-0.04	0.74	0.51
Sabaneta-Pucuato	3.87	0.71	0.54
Tuxpán	-10.78	0.71	0.54

Las calibraciones para este modelo resultaron estar entre muy buenas y buenas (de acuerdo con la clasificación anterior), por lo que el modelo cumple con las características estadísticas para ser aceptado y proceder con el cálculo de los escurrimientos en la cuenca.

7.7.1.2.2 Modelación de los escurrimientos

Una vez calibrado y validado el modelo, se procede a la simulación de los escurrimientos para el periodo histórico de datos del año 1952 - 2010.

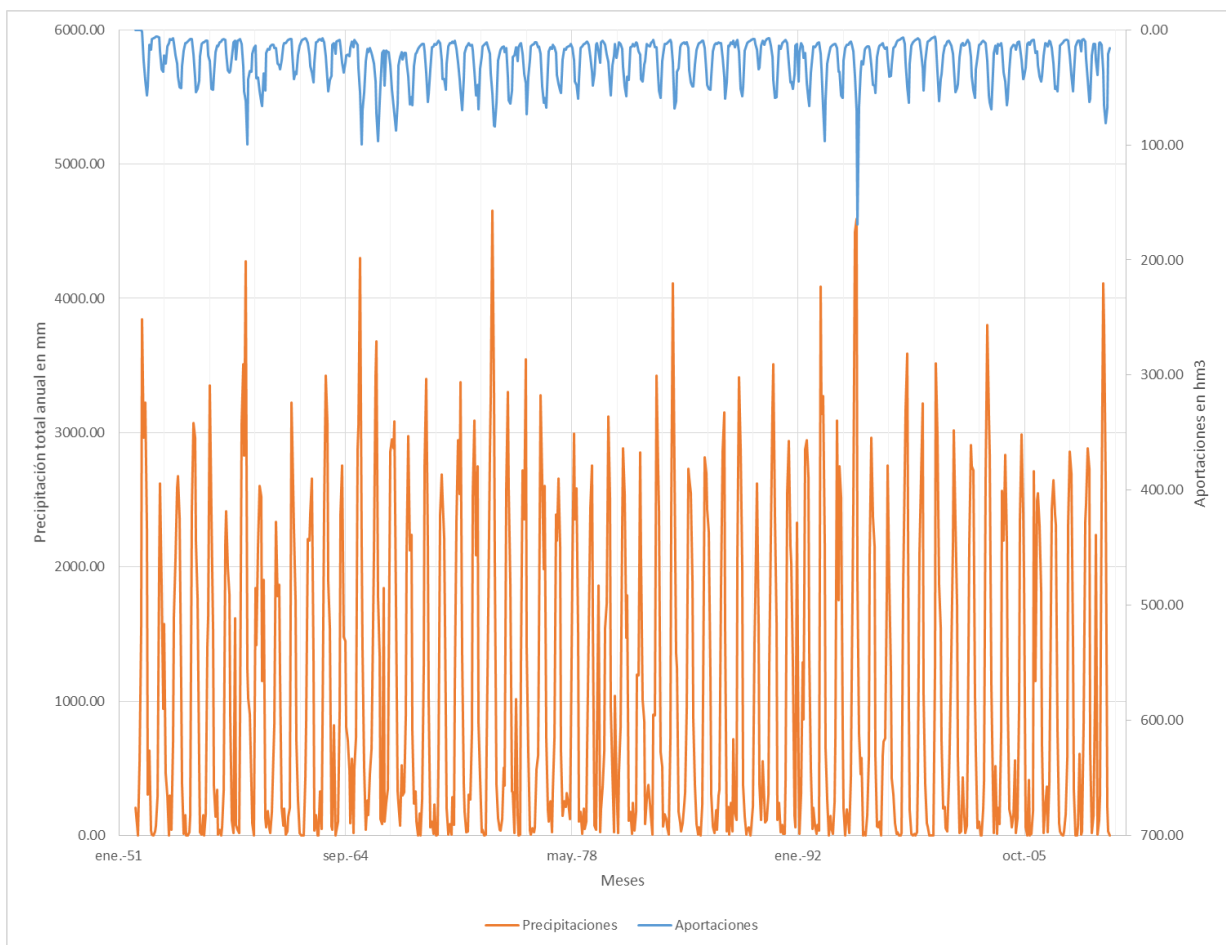


Figura 7.50 Comportamiento de las precipitaciones y resultado de la simulación de los escurrimientos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo HBV.

Como resultado obtenemos el balance hidrológico de la cuenca para dicho periodo. Del balance podemos desglosar las aportaciones y entender que pasa con cada uno de los elementos del ciclo del agua en el modelo.

Tabla 7.29 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo HBV.

Variables	mm/mes	hm ³ /año	%
Precipitación	85.5	1252.0	
ET Potencial	62.0	877.2	
ET Real	49.0	704.2	56
Infiltración	14.6	222.7	18
Escurrimiento Sup	21.3	317.0	25
Escurrimiento Subt	8.9	130.4	
APORTACIÓN	30.2	447.2	100.0

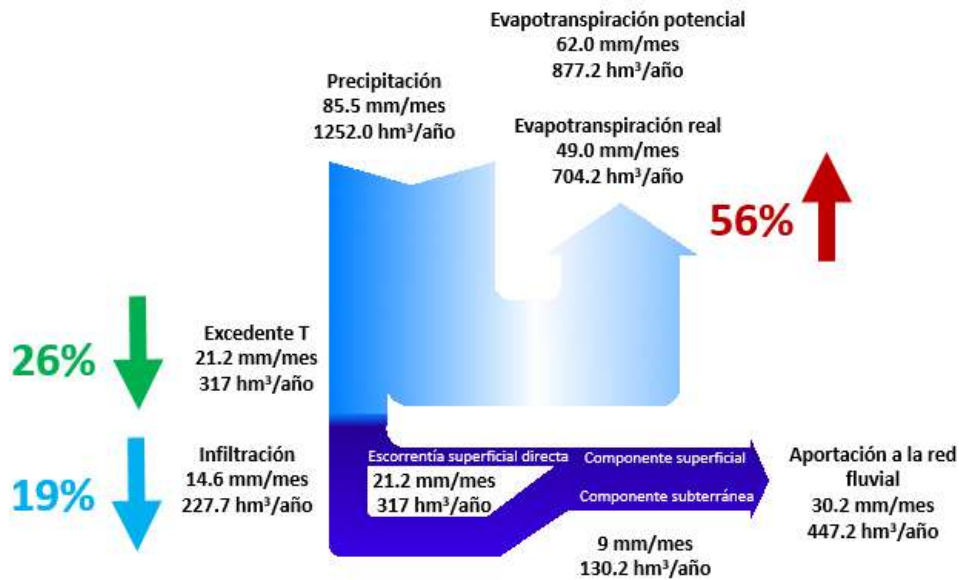


Figura 7.51 Balance hidrológico en la cuenca del río Tuxpan para el periodo de 1952-2010, utilizando el modelo de HBV.

7.7.2 Modelación hidrológica con la herramienta PATRICAL

El módulo de simulación “PATRICAL” (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua) es un modelo del ciclo hidrológico distribuido espacialmente, con paso de tiempo de simulación mensual.

Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico, en régimen natural o en régimen alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada pequeño elemento (p.e. resolución de 1 km x 1 km) en que discretiza la cuenca hidrográfica, incluyendo la menor posibilidad de evapotranspiración de la vegetación con contenidos bajos de humedad en el suelo, las transferencias laterales entre acuíferos, las relaciones río-acuífero (incluyendo la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos.

PATRICAL está integrado al Sistema de Información Geográfica GRASS, por lo que no posee una interfaz propia. Los archivos de ingreso al modelo son del tipo “.asc”, formato ASCII.

La información que debe ingresarse al modelo es la siguiente:

- Coordenadas de la región en estudio
- Series de precipitaciones y temperaturas
- Mapa de la cuenca en estudio
- Modelo digital de elevaciones
- Mapa de uso de suelo
- Mapa de geología de la zona
- Mapa del acuífero relacionado con la cuenca en estudio.
- Características del acuífero y de la relación río-acuífero.
- Archivo de puntos que indique los sitios en que se desea conocer los gastos.

Cada uno de los mapas de ingreso al modelo deben estar en formato tipo ASCII, y con una resolución de la celda de 1000m x 1000m.

El modelo requiere esta resolución, debido a que es del tipo distribuido y discretiza la cuenca en celdas para aplicar las ecuaciones de balance y transferencia

en cada una de ellas. El modelo calcula en cada celda la escorrentía total e integra las mismas en aquellas cuencas que drenan a los puntos de control.

El programa es capaz de hacer el llenado de las series de datos. Al ingresar los archivos de precipitación y de temperatura, bastará con poner el valor de -100 en la celda que corresponde al dato vacío para que el programa haga la interpolación y la generación de las series.

El método que utiliza es el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, proceso que ya se ha descrito anteriormente y que además fue el empleado para el llenado de las estaciones climatológicas que se utilizaron en la modelación de EVALHID.

Para la modelación de la cuenca, fue necesario hacer una discretización de la misma, estableciendo subcuencas en cada uno de los puntos de medición de gasto o de control que se tienen en la zona.

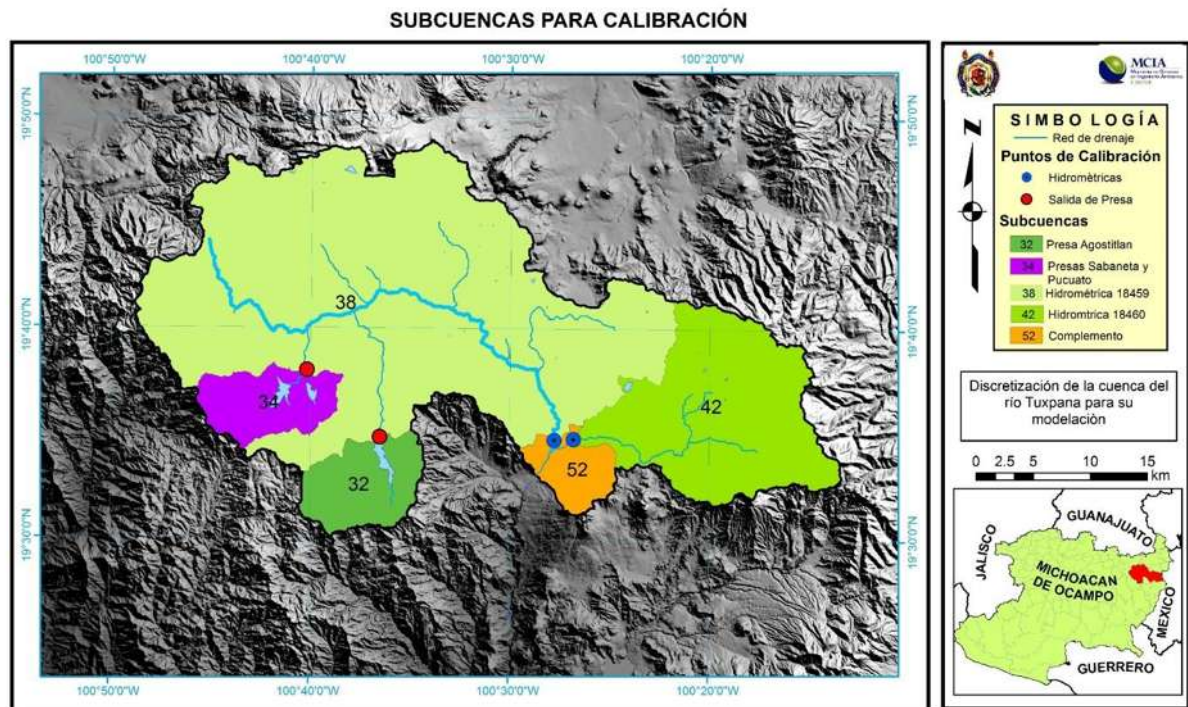


Figura 7.52 Discretización de la cuenca para la calibración.

La figura 7.54 muestra la discretización que se hizo de la zona en estudio para lograr calibrar en su totalidad. Se identifican cuatro zonas, a cada una de ellas le pertenece un código que está asociado con la manera en que el software lee los datos. Los puntos que se encuentran en rojo son puntos de calibración en los que no existe una estación hidrométrica establecida, sin embargo se eligieron estos sitios porque ahí se conocen datos que han sido medidos por los embalses y, que permiten la calibración del modelo en estos puntos. Existen dos puntos de calibración más, se trata de los establecidos por las estaciones hidrométricas que existen en ese sitio y que ya han sido documentadas anteriormente en este trabajo.

El mapa que se muestra en la figura 7.51 fue ingresado al modelo utilizando el formato que el software requiere para su lectura. De aquí se desprende el hecho de que el modelo genera una serie de precipitación, temperatura y evapotranspiración para cada una de las zonas en que se discretiza la cuenca.

La interpolación de las series de precipitación y de temperatura la realiza mediante el método de media móvil y el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, mientras que la serie de datos de evapotranspiración se genera empleando el método de Thornthwaite. El programa también realiza de manera automática el extendido de las series de datos climatológicos que el modelo requiera dependiendo del periodo de simulación que se haya establecido por el modelador.

PATRICAL es capaz de generar mapas de distribución espacial de las variables precipitación, evapotranspiración y temperatura a escala mensual de la zona en estudio (Fig. 7.55).

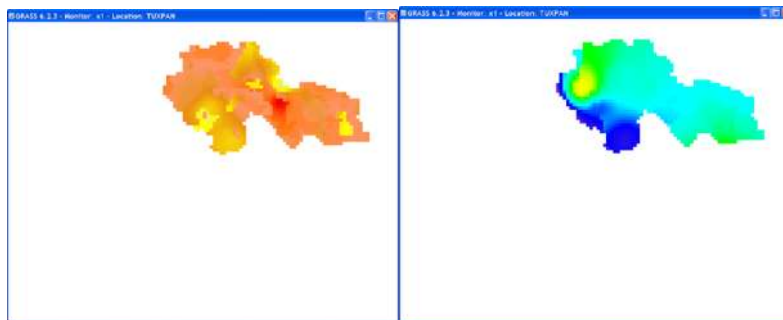


Figura 7.53 Mapas mensuales de precipitación (derecha) y temperatura (izquierda) para la cuenca del río Tuxpan.

7.7.2.1 Calibración

✓ Subcuenca de la presa Agostitlán

La primera zona de calibración con la herramienta PATRICAL es la subcuenca del río Angangueo. Como ya se ha mencionado anteriormente se trata de una subcuenca con una superficie de 239 m².

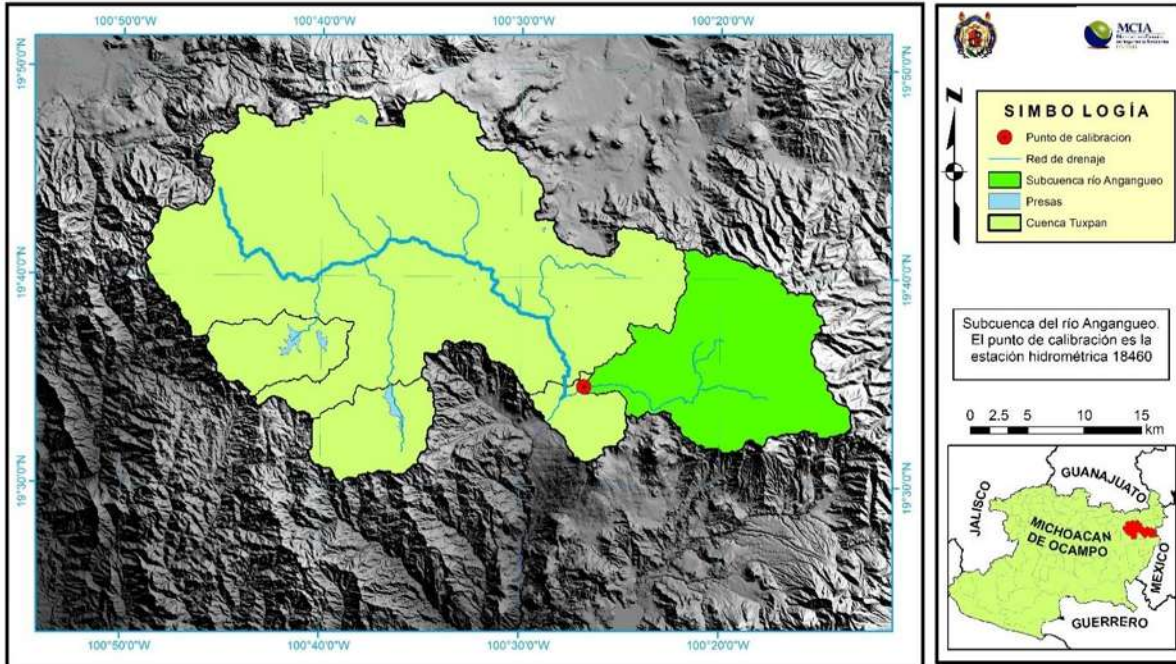


Figura 7.54 Subcuenca del río Angangueo..

En la etapa de calibración del modelo de Témez distribuido utilizando esta herramienta, es de suma importancia llevar a cabo una discretización del uso y tipo de suelo, además de la geología de cada subcuenca de modelación. El modelo asigna a cada uno de los pixeles un uso y tipo de suelo, y una geología determinada. En cada celda aplica las ecuaciones del modelo de Témez y va haciendo el balance de masas celda a celda.

Para el caso de la subcuenca del río Angangueo, se identificaron los siguientes usos de suelo y de tipos de rocas. De acuerdo con esta clasificación se asignan los parámetros de calibración (Figuras 7.57 y 7.58).

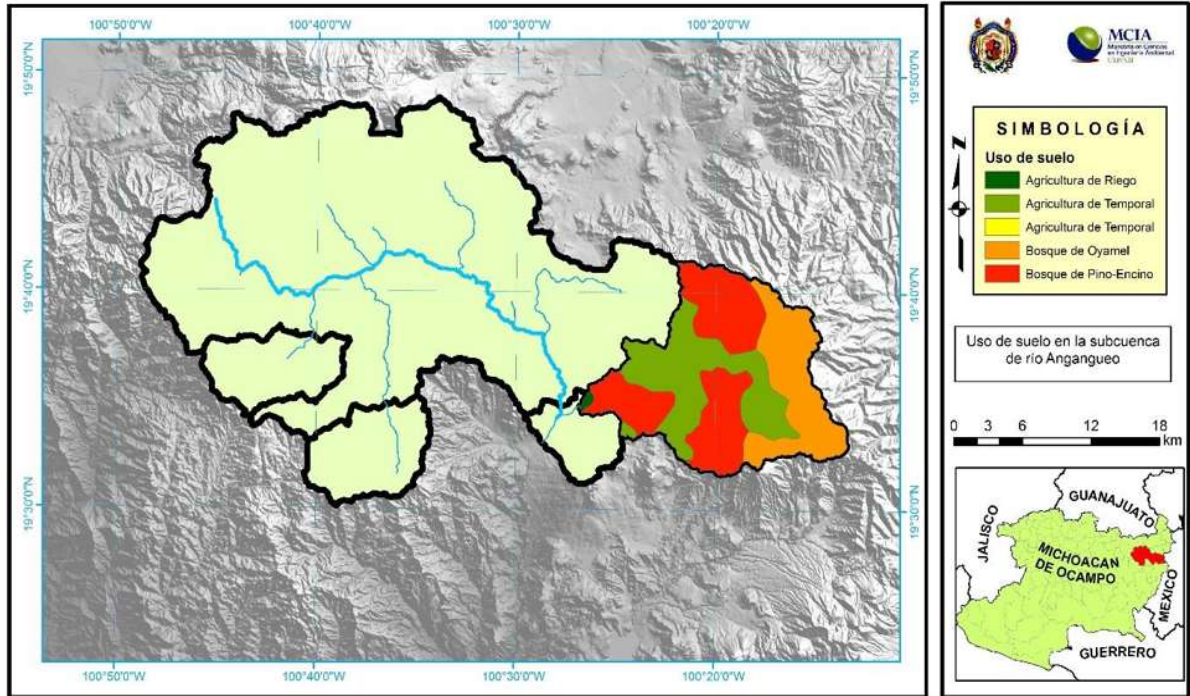


Figura 7.55 Uso de suelo en la subcuenca del río Angangueo

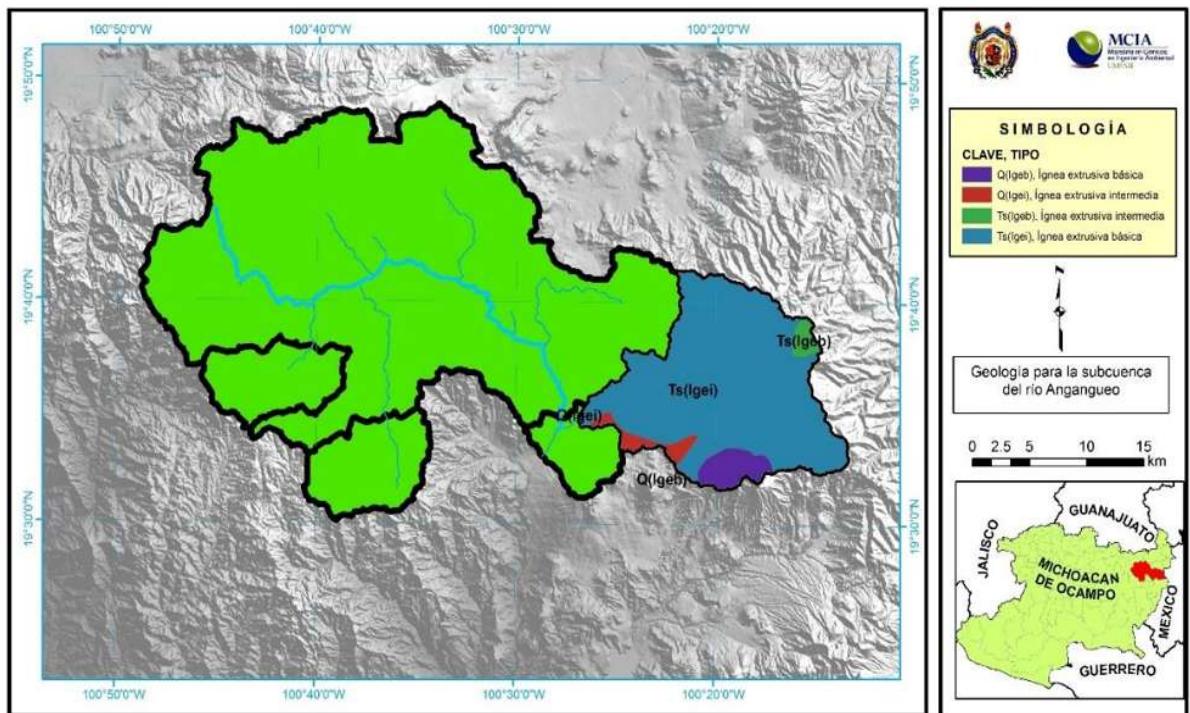


Figura 7.56 Geología de la subcuenca del río Angangueo

La calibración no utiliza ningún algoritmo automatizado que ajuste los parámetros de calibración del modelo hasta lograr ajustar los datos calculados con los observados, para este caso la calibración se hace “a mano”; se programó una hoja de cálculo que permite el ingreso de las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración, y que aplica las ecuaciones del modelo de Témez (Témez 1977). De esta manera se varían de manera manual los parámetros hasta lograr que los caudales calculados a partir de las series de datos generadas por el modelo a través de la hoja de cálculo logren ajustarse con los datos medidos.

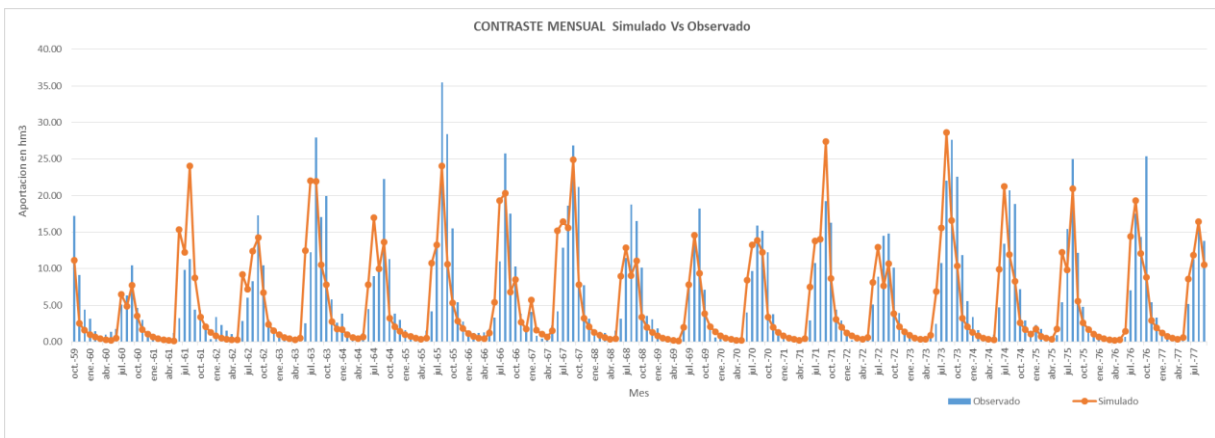


Figura 7.57 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.

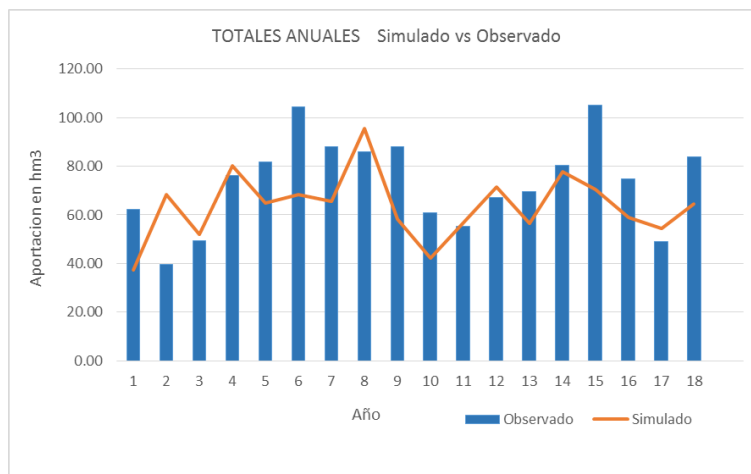


Figura 7.58 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca del río Anganguero.

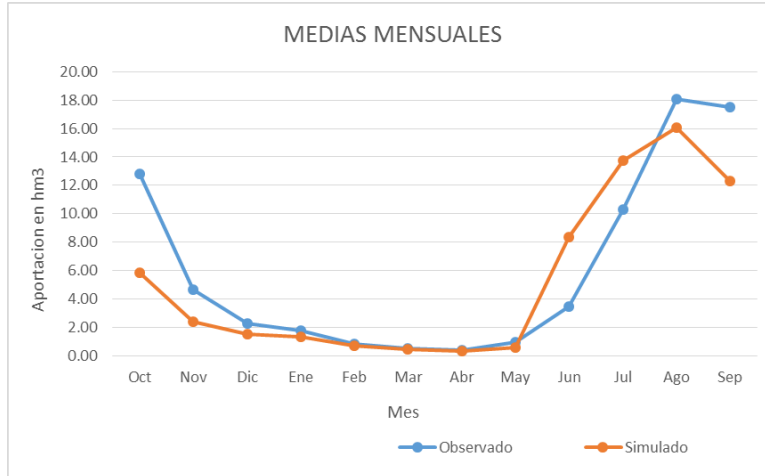


Figura 7.59 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Angangueo.

✓ **Subcuenca de la presa Agostitlán**

La subcuenca de la presa Agostitlán o Mata de Pinos, tiene una superficie de 71 km².

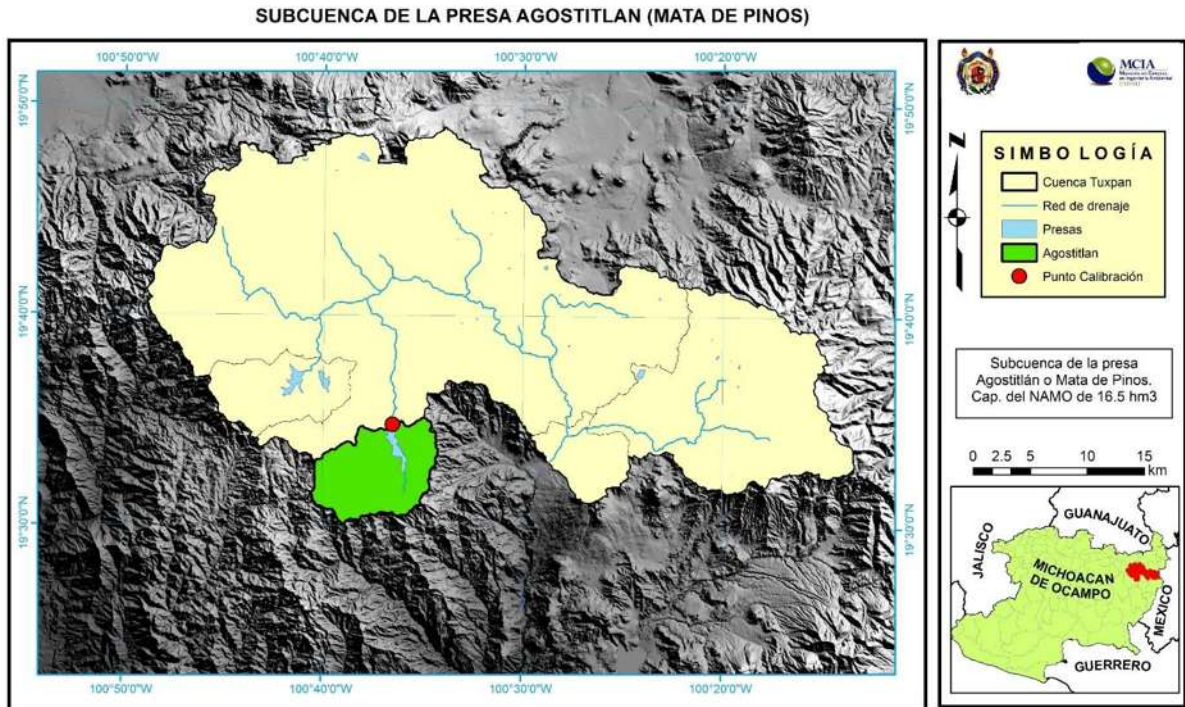


Figura 7.60 Subcuenca de calibración de la presa Agostitlán

Recordemos que el punto de calibración para esta subcuenca es el sitio donde se registran las salidas de la presa Agostitlán. La función de esta presa es de almacenamiento de agua para abastecer al distrito de riego 045, su capacidad del NAMO es de 16.5 hm³.

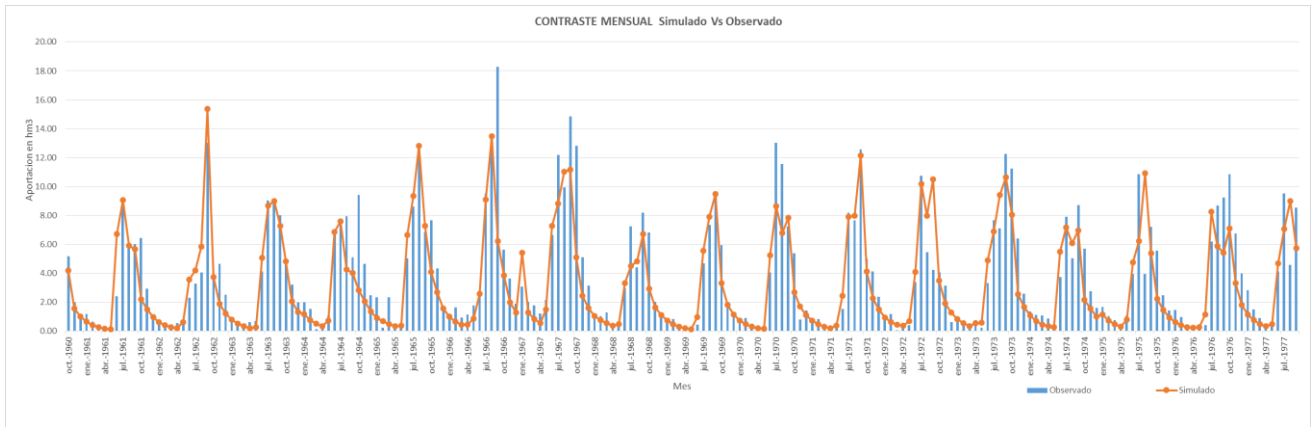


Figura 7.61 Resultados mensuales de calibración para a presa Agostitlán.

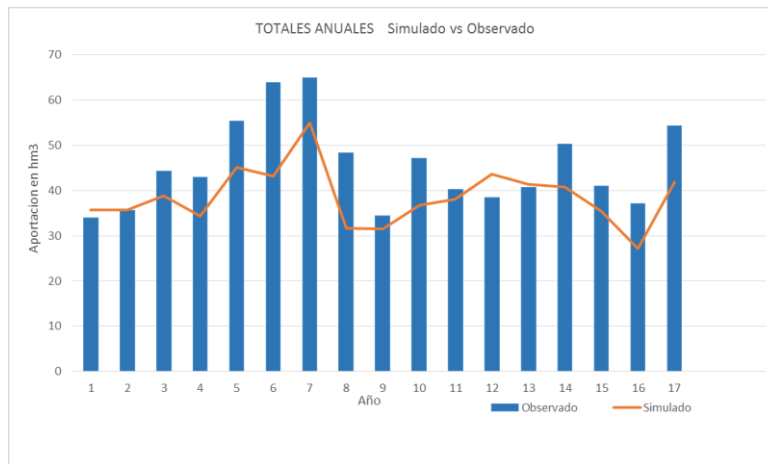


Figura 7.62 Resultados anuales de calbarción para la presa Agostitlán.

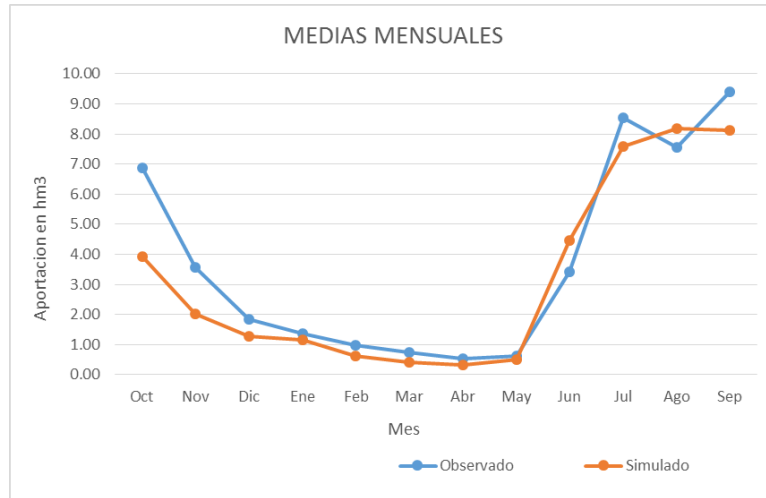


Figura 7.63 Resultados año medio para la presa Agostitlán.

✓ **Subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuató.**

El área para esta subcuenca es de 66 km², el punto de calibración son las entradas a las presas Sabaneta y Pucuató.

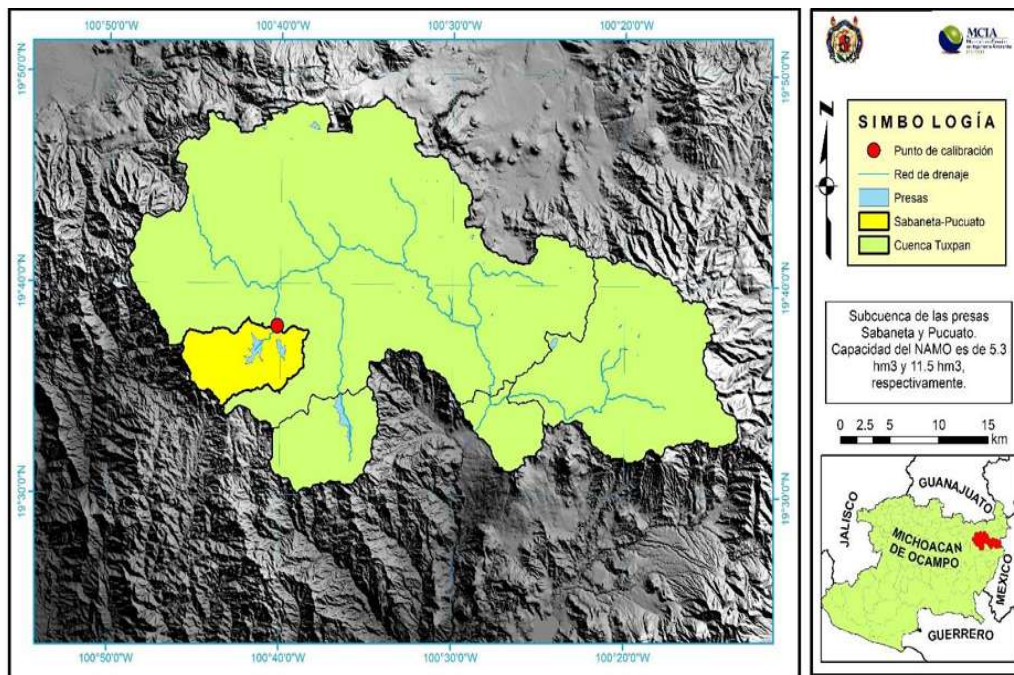


Figura 7.64 Subcuenca de calibración de las presas Sabaneta y Pucuató.

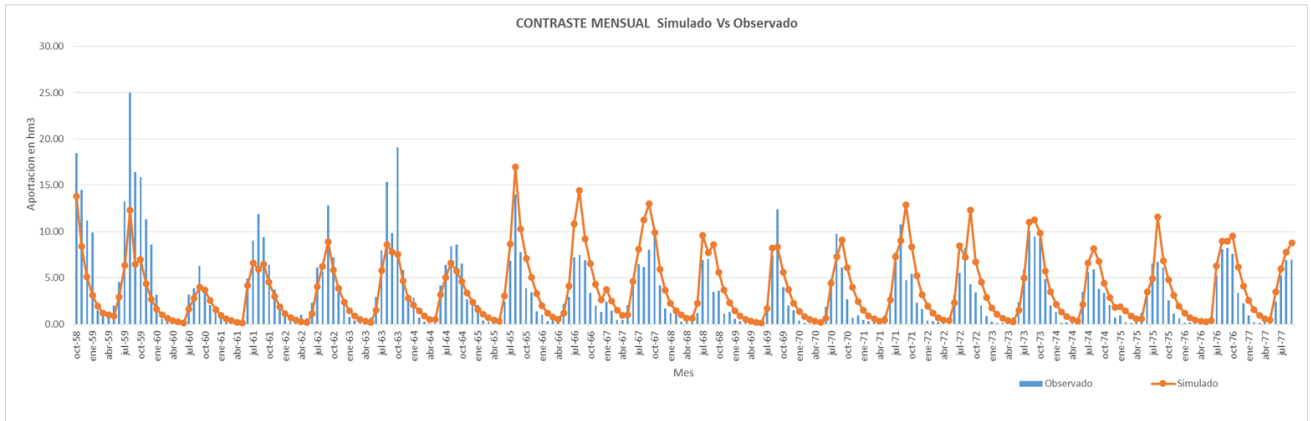


Figura 7.65 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuito.

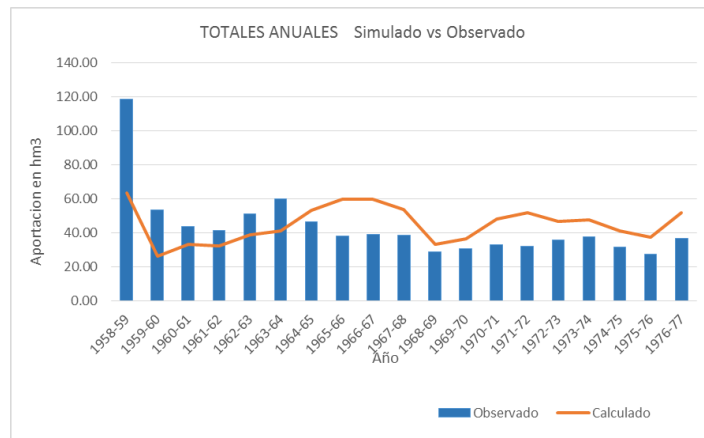


Figura 7.66 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuito.

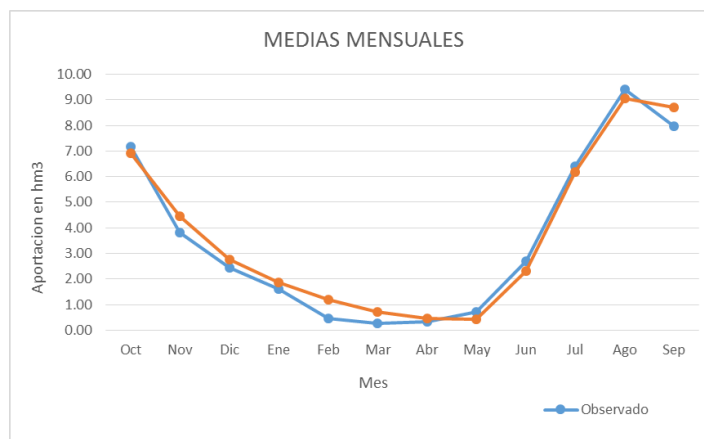


Figura 7.67 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca de las presas Sabaneta y Pucuito.

✓ **Subcuenca del río Tuxpan.**

La calibración de la subcuenca del río Tuxpan abarca una superficie de 824 km². El punto de calibración es la estación hidrométrica 18459. Como se ha mencionado anteriormente, los caudales para la calibración de ésta subcuenca deben ser restituidos a régimen natural ya que el modelo así lo requiere (ver apartado Témex).

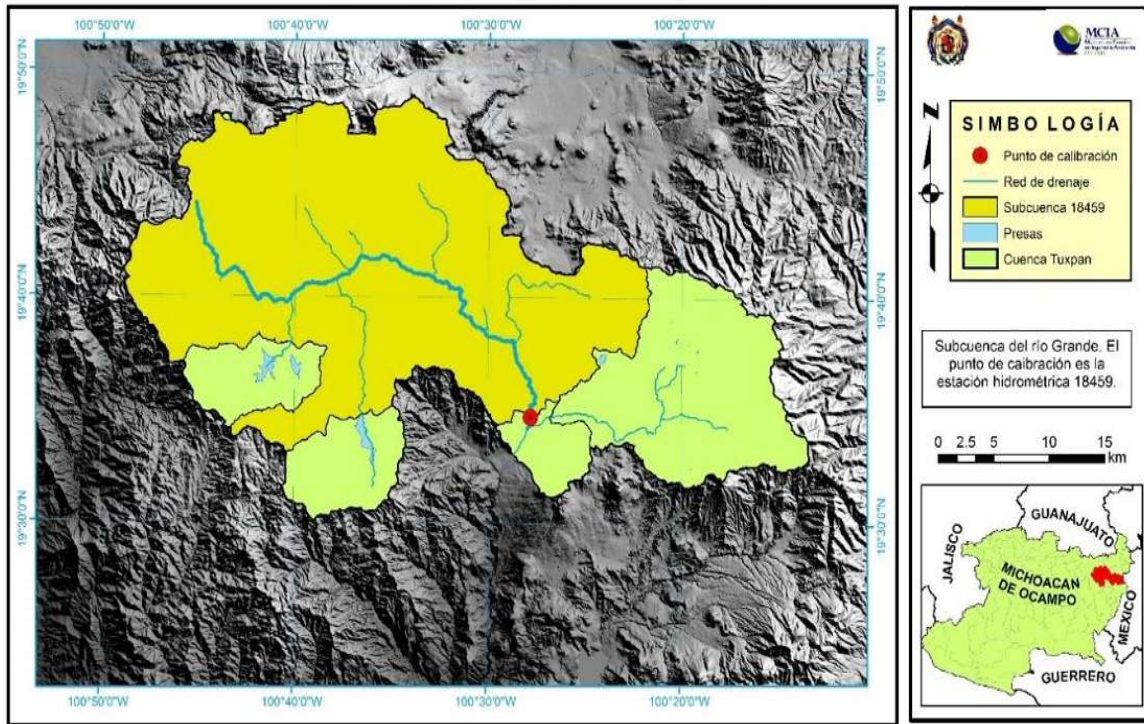


Figura 7.68 Subcuenca de calibración del río Grande o Tuxpan.

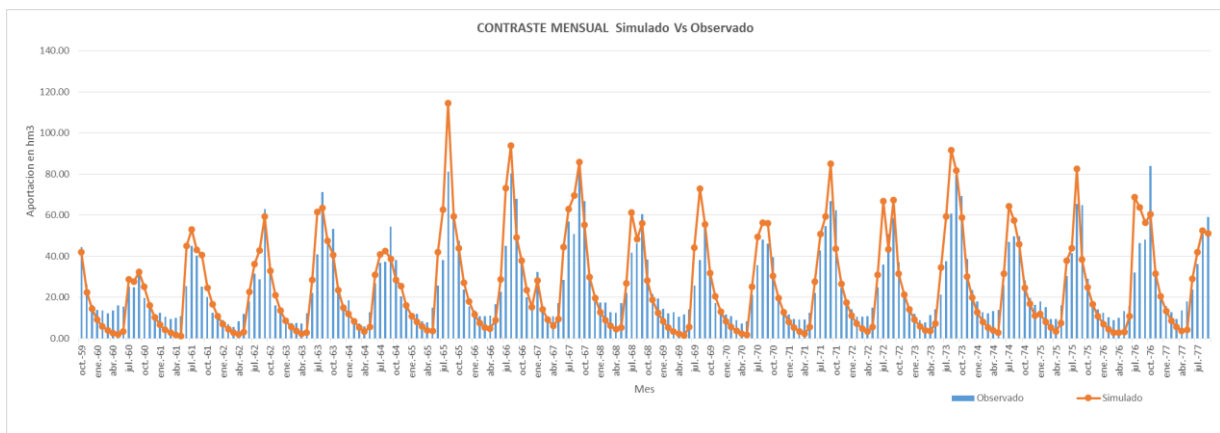


Figura 7.69 Resultados mensuales de la calibración de la subcuenca del río Grande o Tuxpan.

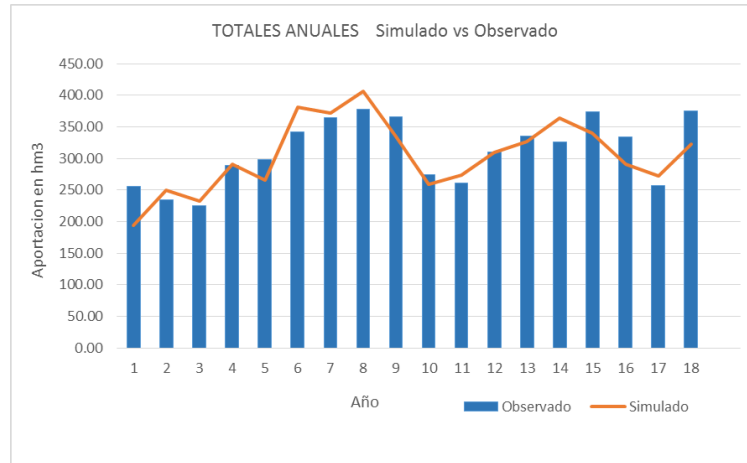


Figura 7.70 Resultados anuales de la calibración de la subcuenca de río Tuxpan.

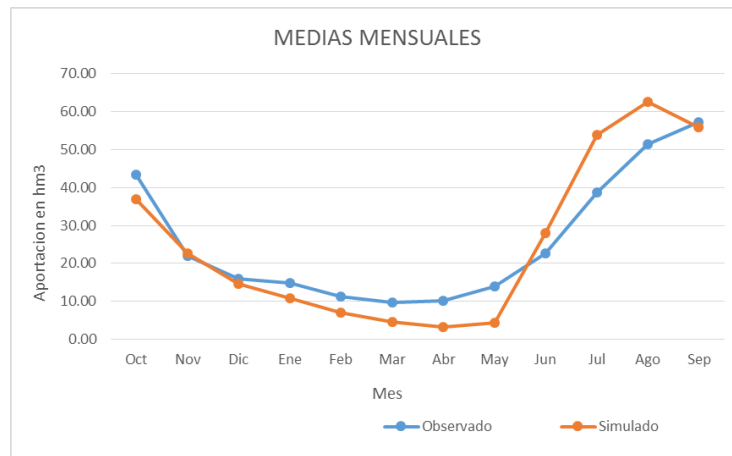


Figura 7.71 Resultados del año medio de la calibración de la subcuenca del río Tuxpan.

Los parámetros de calibración del modelo, son más discretizados que los obtenidos en los modelos anteriores. Esta herramienta asigna a cada uso de suelo y a cada tipo de roca en el acuífero, un valor distinto de cada parámetro.

Tabla 7.30 Resumen de parámetros del modelo de Témez (ecuaciones aplicadas de manera distribuida).

Humedad máxima (mm)	
Hmáx	Uso de suelo
200	Agricultura de riego
150	Agricultura de temporal
40	Area urbana
100	Bosque cultivado
110	Bosque de encino
100	Bosque de encino-pino
230	Bosque de oyamel
200	Bosque de pino
110	Bosque de pino-encino
120	Bosque mesofilo de montaña
103	Pastizal inducido
101	Selva baja caducifolia
102	Agricultura de temporal y pastizal inducido
100	Vegetación secundaria de selva caducifolia
1000	Superfices de agua

Infiltración máxima (mm)	
Imáx	Tipo de roca
120	Materiales desconocidos
200	Esquisto
100	Metasedimentaria
220	Metavolcanica
240	Volcanoclastico
200	Arenisca-Conglomerado
190	Conglomerado
50	Limolita-Arenisca
250	Ígnea extrusiva ácida
300	Ígnea extrusiva básica
260	Ígnea extrusiva intermedia
300	Ígnea extrusiva básica
270	Ígnea intrusiva ácida

Coeficiente de escurrimiento	
C	Subcuenca
0.3	Anganguero
0.3	Agostitlán
0.3	Sabaneta-Pucuato
0.3	Tuxpan

Parámetro α (1/mes)	
α	Subcuenca
0.5	Anganguero
0.6	Agostitlán
0.5	Sabaneta-Pucuato
0.4	Tuxpan

✓ **Indicadores de ajuste**

El proceso para evaluar la calidad de las calibraciones es exactamente el que se ha seguido en las modelaciones anteriores, sin importar con qué modelo se esté trabajando, los indicadores de ajuste son parámetros que mostrarán las mejoras de una calibración con respecto a otra.

Tabla 7.31 Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo de la cuenca del río Tuxpan. (Moriasi et al., 2007).

Calidad de ajuste	NSE ó E	PBIAS	RSR
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

Tabla 7.32 Resumen de parámetros e indicadores de ajuste de la modelación de la cuenca del río Tuxpan, utilizando la herramienta PATRICAL.

ZONA DE MODELACIÓN	INDICADORES DE AJUSTES		
	PBIAS	NSE	RSR
Anganguero	11.96	0.62	0.62
Agostitlán	15.00	0.70	0.55
Sab-Puc	3.89	0.62	0.50
Tuxpan	2.09	0.71	0.53

7.7.3 Modelación hidrológica con la NOM-011-CONAGUA-2015.

La metodología establecida por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, establece la forma en que debe calcularse el escurrimiento medio anual para una cuenca hidrológica. Este es precisamente el proceso que se ha venido haciendo con los modelos lluvia-escurrimiento.

Sin embargo conviene ejecutar la metodología con la Norma para comparar los resultados que se obtienen de cada uno de los procesos.

Esta metodología se basa principalmente en el uso y tipo de suelo que se tenga en la zona de estudio. Con base en estas características determina un coeficiente de escurrimiento que al ser multiplicado por la precipitación anual de la cuenca y el área de la misma, se obtiene el escurrimiento natural en la cuenca.

A su vez el coeficiente de escurrimiento depende de un parámetro k , que toma en cuenta las características del suelo y la textura que tiene el mismo (CONAGUA, 2015).

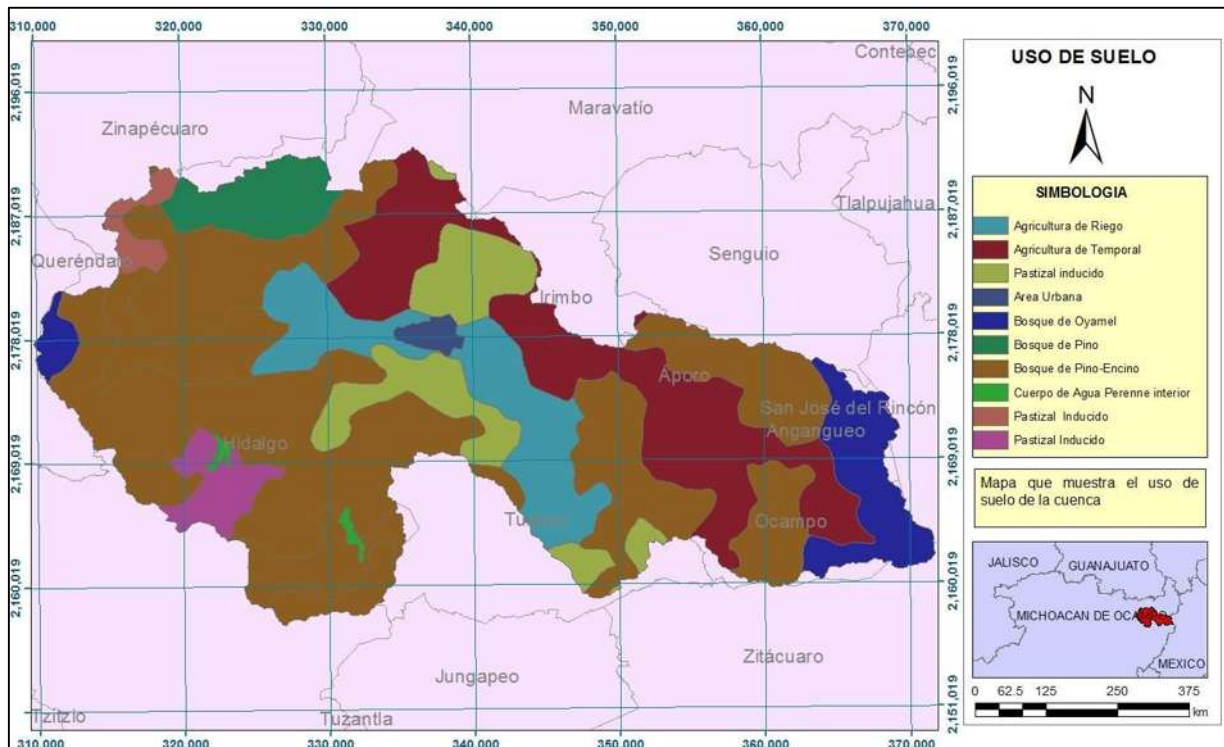


Figura 7.72 Usos de suelo que se tienen en la cuenca del río Tuxpan.

Para calcular el coeficiente de escurrimiento también es necesario definir el tipo de suelo que se tiene en la cuenca, se asigna un valor de 1 a los suelos de textura gruesa, un valor de 2 para los de textura media y, finalmente un valor de 3 para los de textura fina.

En el caso de la zona en estudio, se tienen en la mayor parte del terreno textura media y, en menor porcentaje textura fina.

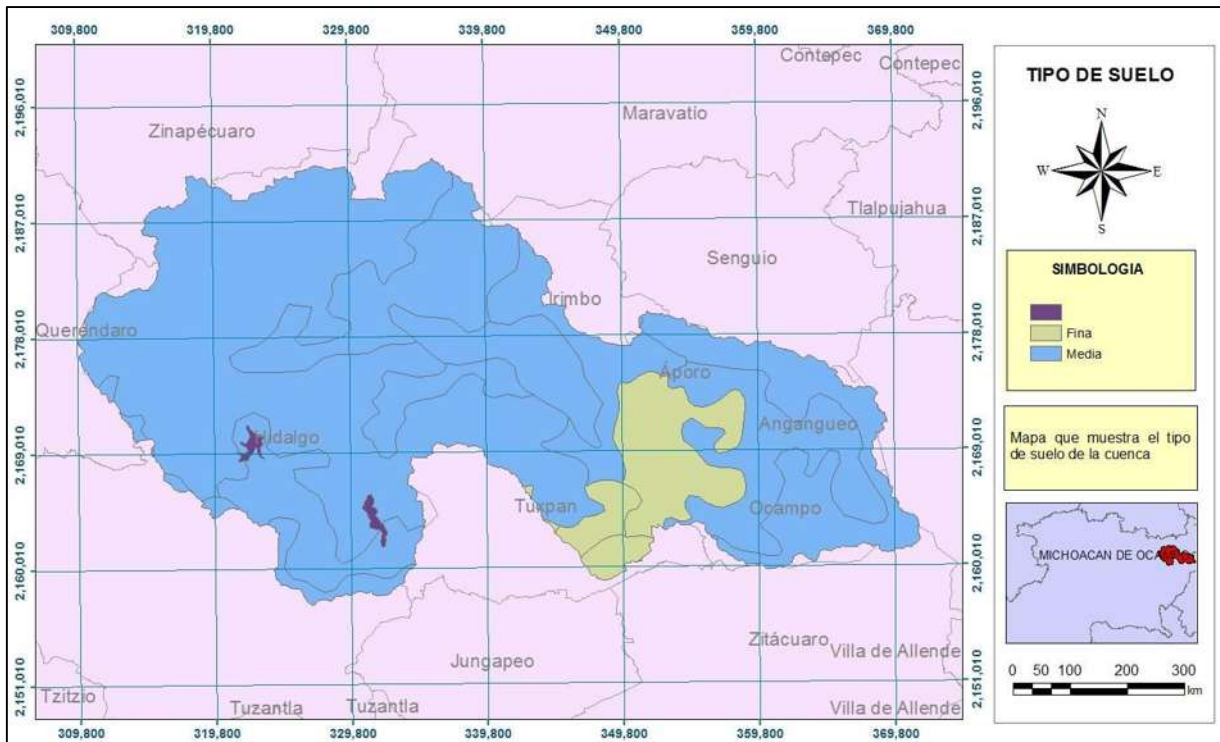


Figura 7.73 Tipo de textura del suelo en la cuenca del río Tuxpan.

Con estos elementos mostrados en los mapas anteriores se calcula el parámetro k para cada una de las subcuencas de la cuenca del río Tuxpan. De esta manera se obtendrá un parámetro “ k ” distinto para cada zona. No existe en la NOM-011 una explicación acerca de la manera en que debe obtenerse este parámetro, sin embargo haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica pudo obtenerse este parámetro y los resultados se muestran en la figura 7.76.

A partir de los valores obtenidos para K , se determina el Coeficiente de escurrimiento (C_e) mediante una expresión que se encuentra establecida en la NOM-011.

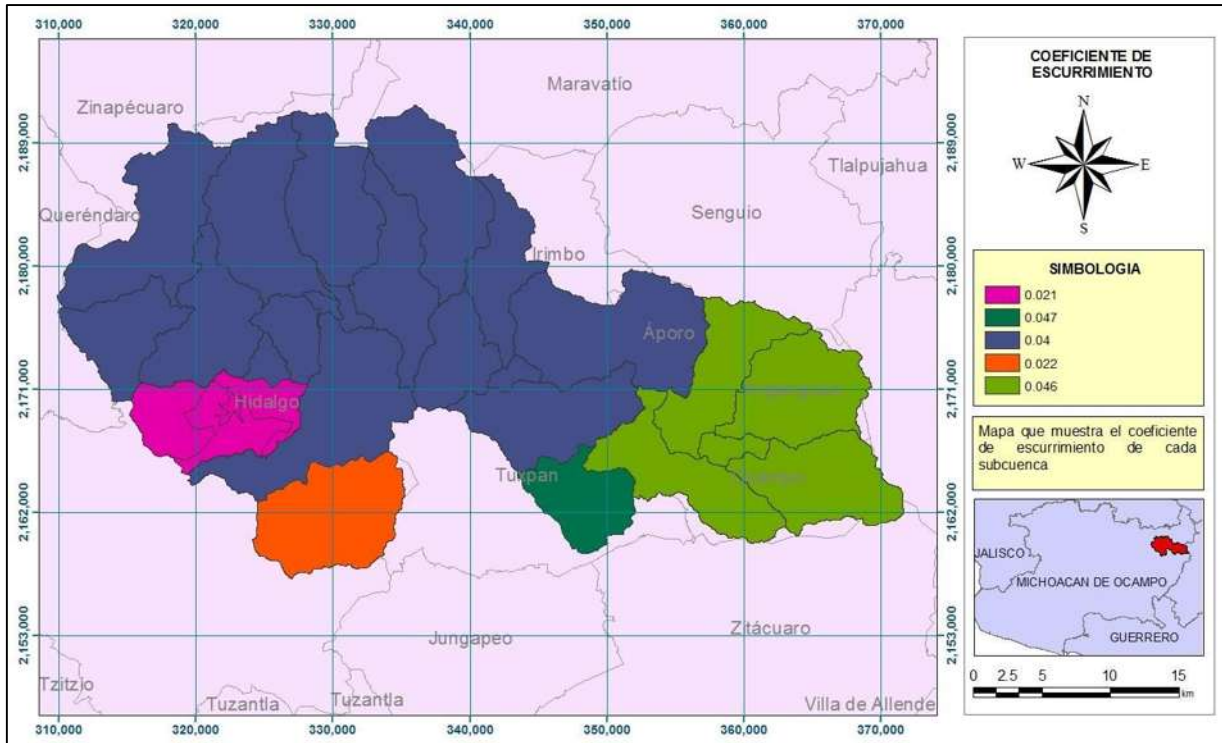


Figura 7.74 Parámetro K, para cada subcuenca de la zona en estudio.

Para determinar la precipitación anual de la cuenca, se dibujaron la Isoyetas en la cuenca, utilizando la información meteorológica disponible para la zona en estudio, misma que ha sido tratada y validada estadísticamente en este trabajo (Fig. 7.77).

Haciendo uso de la siguiente expresión se puede determinar el escurrimiento natural medio anual para cada subcuenca.

$$\text{Volumen anual de escurrimiento} = \text{Precipitación anual de la cuenca} * \text{Área de la cuenca} * \text{Coeficiente de escurrimiento}$$

La precipitación y el área se ingresan en metros y metros cuadrados, respectivamente; mientras que el coeficiente de escurrimiento (Ce) es adimensional.

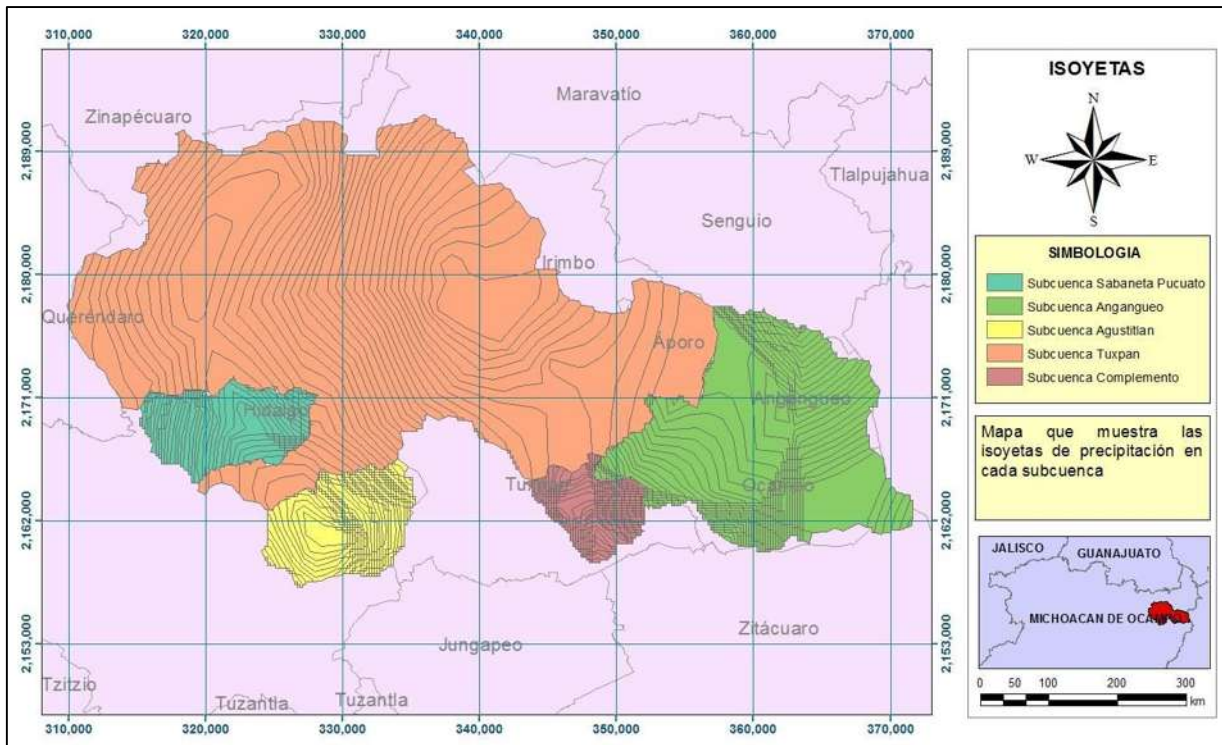


Figura 7.75 Mapa de Isoyetas de la cuenca del río Tuxpan.

Los resultados de la disponibilidad hídrica media anual obtenidos para cada subcuenca, utilizando la metodología establecida por la NOM-011-CONAGUA-2015, se muestran en la tabla 7.34.

Tabla 7.33 Resumen de los escurrimientos medios anuales en cada subcuenca de modelación, obtenidos con la NOM-011 en hm³/año

SUBCUENCA	Parámetro k	Precipitación media anual (mm)	Área (km ²)	Ce	Volumen natural de escurrimiento natural (hm ³)
Angangueo	0.27	983.22	239.00	0.178	41.8
Tuxpan	0.26	1039.50	783.00	0.175	142.4
Agostitlan	0.23	1238.88	71.00	0.167	14.7
Subaneta_Puc	0.22	1189.93	64.00	0.15	11.4
Complemento	0.27	917.76	39.00	0.17	6.1
TOTAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL EN LA CUENCA =					216.5

Este resultado muestra que existe un escurrimiento natural promedio anual en la cuenca del río Tuxpan de 216.5 hm³. Lo que permite comparar éste volumen con los obtenidos en los balances de los modelos hidrológicos utilizados y descritos anteriormente.

7.8 Modelación hidrológica con cambio climático

El objetivo principal de este trabajo es mostrar el efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Tuxpan. Para ello es necesario obtener datos de precipitación y temperatura que estén afectados con la variable cambio climático para la zona en estudio.

Una vez calibrados los modelos hidrológicos, éstos pueden ser alimentados con datos de naturaleza distinta, como lo son los de cambio climático y, obtendremos una simulación de esta información bajo el esquema del modelo de la cuenca.

7.8.1 Series de cambio climático

El organismo oficial en México para la obtención de información sobre cambio climático es el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quienes han desarrollado información con la que pueden alimentarse modelos hidrológicos.

Los datos de cambio climático de temperatura y precipitación, son series de datos llenas. Al obtenerlas de los sitios de internet son series completas de datos, por lo que no requieren llenado.

México ha desarrollado información de cambio climático bajo cuatro escenarios climáticos regionales: el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y, el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y, administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), llevaron a cabo el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En dicho estudio se realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México, que serán utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de cambio Climático (IPCC), (INECC, 2014).

Bajo el esquema de esta información, fue necesario definir las estaciones de cambio climático que se encuentran afectando la zona que se tiene en estudio, para posteriormente descargar las series de datos y aplicar el tratamiento adecuado para poder utilizar los datos de manera confiable (Metodología descrita en el capítulo 6).

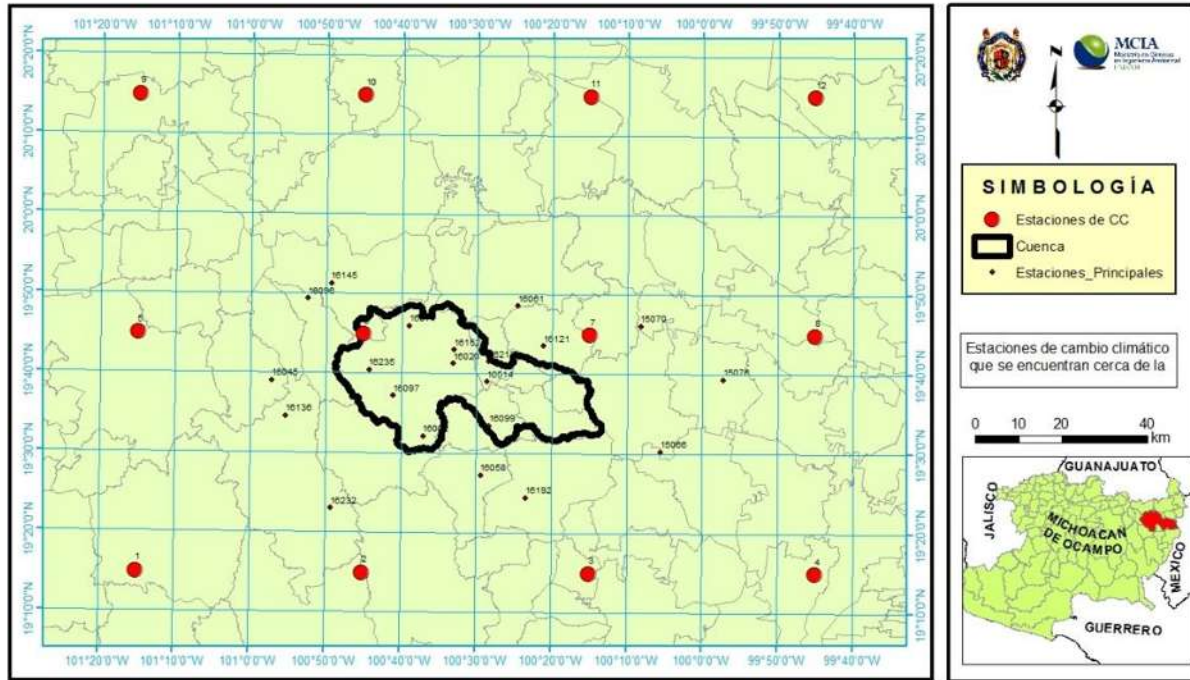


Figura 7.76 Estaciones de cambio climático que tienen influencia en la zona de estudio.

Una vez obtenidos los puntos de interés, se descargan series de precipitación y de temperatura de la página del INECC. Se obtienen series para cada uno de los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5, para dos periodos de datos: corto plazo 2015-2039 y, largo plazo 2075-2099.

7.8.2 Validación estadística de las series

A cada una de las series de precipitación, se le aplicaron las pruebas de independencia y homogeneidad que se utilizaron para las series históricas. El objetivo es comprobar que los datos que ingresaremos a los modelos sean datos que cumplan con las características de las series climáticas. Estos datos son solo proyecciones, es

muy importante que cumplan con las mínimas características de las series meteorológicas.

La homogeneidad de las series se probó a través de los test de Helmert y Secuencias, los resultados se concentran en la tabla 7.34.

Tabla 7.34 Resumen de las pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las estaciones de cambio climático.

Estación	Helmert	Secuencias
15066_CC	Homogénea	Homogénea
16002_CC	Homogénea	Homogénea
16020_CC	Homogénea	Homogénea
16071_CC	Homogénea	Homogénea
16097_CC	Homogénea	Homogénea
16099_CC	Homogénea	Homogénea
16121_CC	Homogénea	Homogénea
16145_CC	Homogénea	Homogénea
16152_CC	Homogénea	Homogénea
16213_CC	Homogénea	Homogénea
16235_CC	Homogénea	Homogénea
16514_CC	Homogénea	Homogénea
16192_CC	Homogénea	Homogénea

Por otra parte, la independencia de las series de precipitación se probó mediante los límites de Anderson. Los resultados de muestran en la tabla 7.35

Tabla 7.35 Resumen de la prueba de independencia a las series de cambio climático.

Código	Anderson
15066_CC	Independiente
16002_CC	Independiente
16020_CC	Independiente
16071_CC	Independiente
16097_CC	Independiente
16099_CC	Independiente
16121_CC	Independiente
16145_CC	Independiente
16152_CC	Independiente
16213_CC	Independiente
16235_CC	Independiente
16514_CC	Independiente
16192_CC	Independiente

7.8.3 Modelación de los escurrimientos utilizando las herramientas EVALHID Y PATRICAL.

La modelación de los escurrimientos con efectos del cambio climático, se hace a través de los modelos hidrológicos Témez y HBV.

El hecho de que los modelos se encuentren calibrados y validados para la zona en estudio, permite simular gastos para periodos futuros. Basta con ingresar los nuevos archivos de precipitación y temperatura afectados con la variable de cambio climático y, se obtienen las simulaciones de la disponibilidad hídrica futura para la cuenca en estudio.

Para el caso particular de la cuenca del río Tuxpan, se simularon los escurrimientos para el periodo de 2015-2039 y 2075-2099, para cada uno de los escenarios RCP 4.5, 6.0 Y 8.5.

Las tendencias de las precipitaciones y las temperaturas para cada escenario y para cada periodo de tiempo se ven reflejadas en las figuras 7.76 y 7.77, donde pueden apreciarse las variaciones que se pronostican para estas variables considerando los efectos del cambio climático.

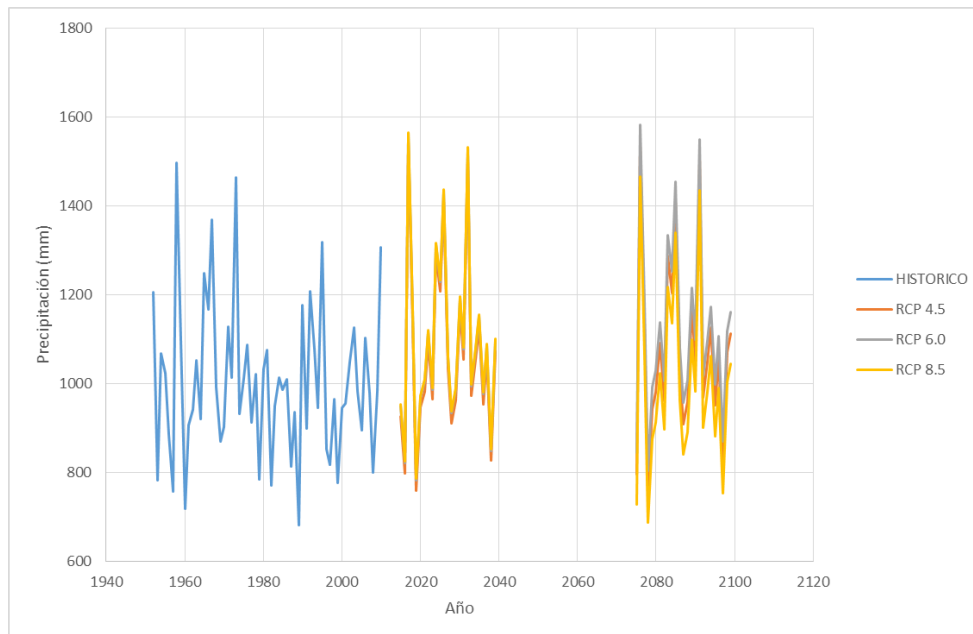


Figura 7.77 Figura que describe la tendencia histórica de las precipitaciones para los periodos 1952-2010; y proyecciones de las mismas con cambio climático para los periodos 2015-2039 y 2075-2099.

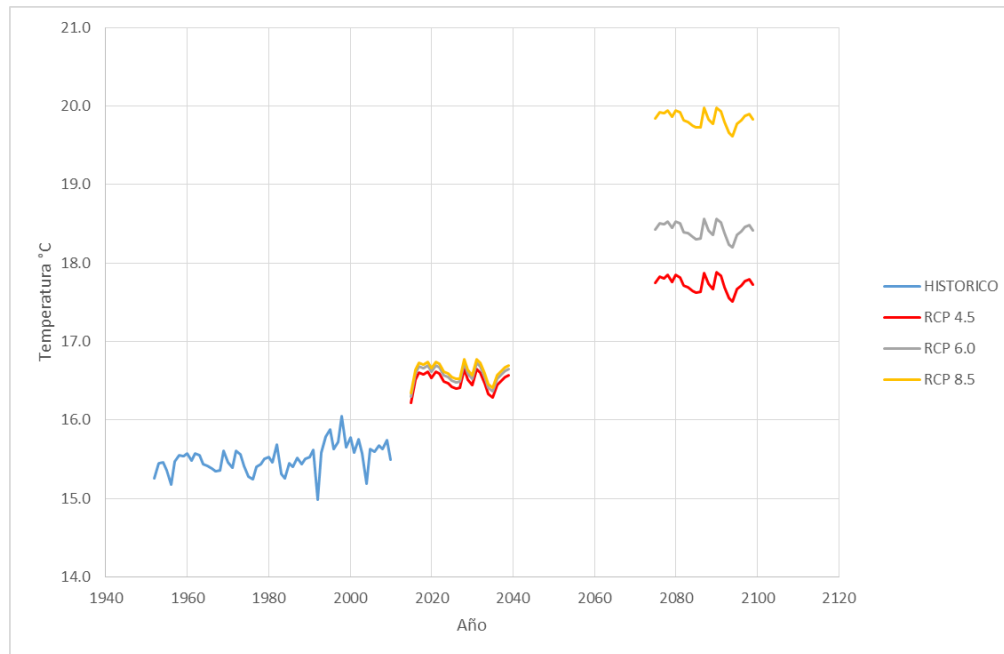


Figura 7.78 Gráfica que describe la tendencia histórica de las temperaturas para los periodos 1952-2010; y proyecciones de las temperaturas con cambio climático para los periodos 2015-2039 y 2075-2099.

Las precipitaciones registran variaciones que no siguen una tendencia clara para el periodo de 2015-2039, sin embargo para el periodo de 2075-2099 se registra una disminución en esta variable de aproximadamente 3% con respecto a la media de los datos históricos reales.

En cuanto a la variable de temperatura, es evidente que existe una tendencia clara que va en aumento para el periodo de 2075-2099. La temperatura promedio actual para la cuenca del río Tuxpan es de aproximadamente 15°C. Para el periodo de 2015-2039 se espera que la temperatura aumente aproximadamente 1°C, el incremento de la temperatura en 1°C puede ocasionar variaciones importantes en el clima y afectar sectores socioeconómicos clave como el de la agricultura. Para el periodo de 2075-2099, se observan cambios en la temperatura que van desde los 3°C hasta los 4.7°C, este incremento dependerá de la tendencia que se siga en la zona de estudio; es claro que un incremento de esta índole pueden ser catastrófico para el clima de cualquier sitio, ya que este cambio traería consecuencias importantes, no sólo para el sector hídrico sino también para los seres vivos que habitan en la región,

probablemente podrían presentarse fenómenos de migración de especies o incluso de extinción para aquellas que no sean capaces de migrar o de adaptarse.

Utilizando los modelos hidrológicos lluvia-escorrentimiento se obtuvieron los valores de la disponibilidad hídrica media anual para cada uno de los escenarios; a través de la comparativa de éstos, con los volúmenes obtenidos para la modelación hidrológica del periodo actual, se pueden cuantificar las afectaciones que pudieran llegar a ocurrir en los recursos hídricos en la cuenca de acuerdo con cada uno de los escenarios de cambio climático planteados.

Los modelos hidrológicos permiten obtener el balance de los recursos en la cuenca para cada escenario climático y evaluar la afectación de éste en cada una de las variables por separado. Esta acción se vuelve posible ya que se cuenta con el balance de los recursos hídricos “actuales” en la cuenca.

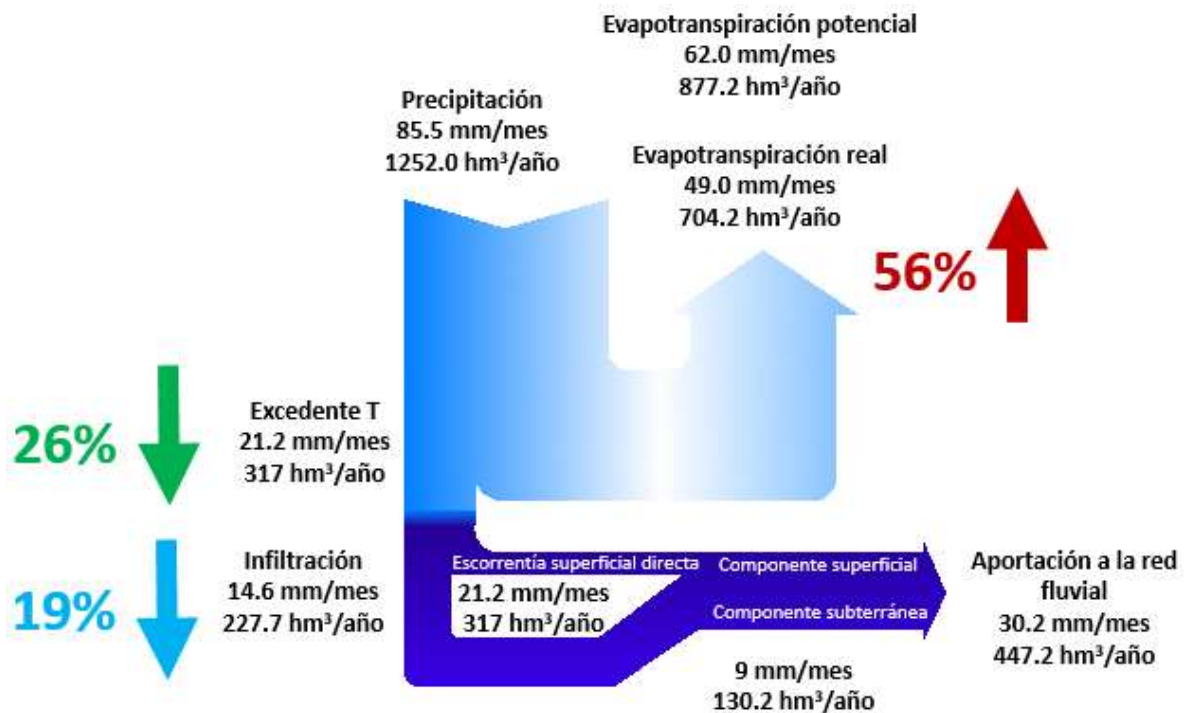


Figura 7.79 Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (1952-2010) obtenido con el modelo HBV.

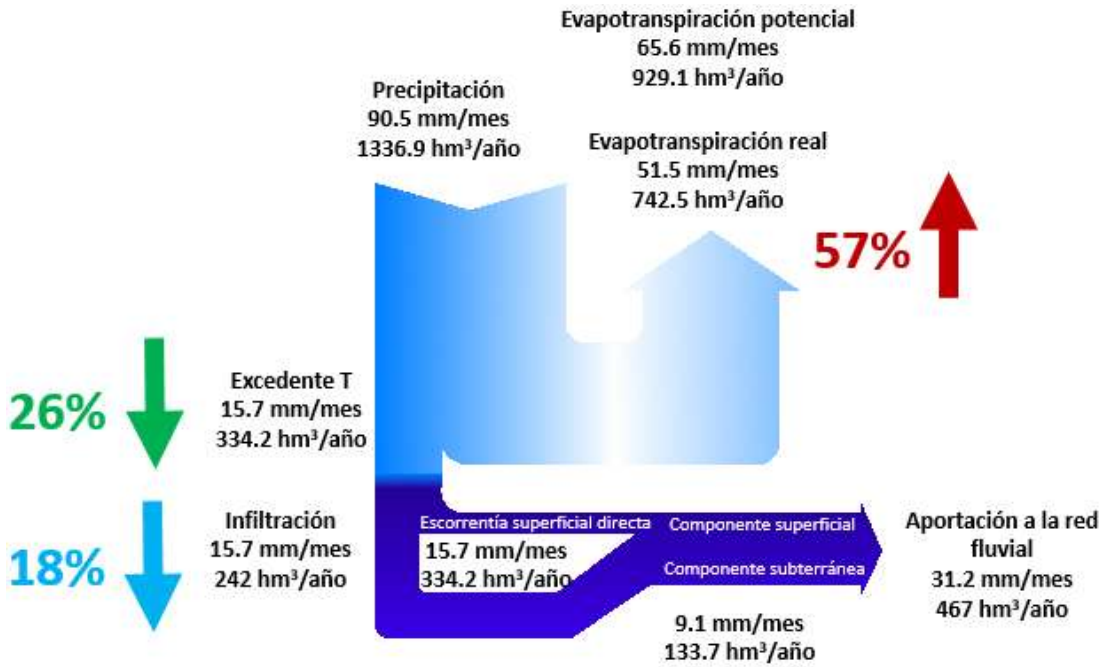


Figura 7.80 Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (2015-2039) obtenido con el modelo HBV para el escenario de cambio climático RCP 4.5.

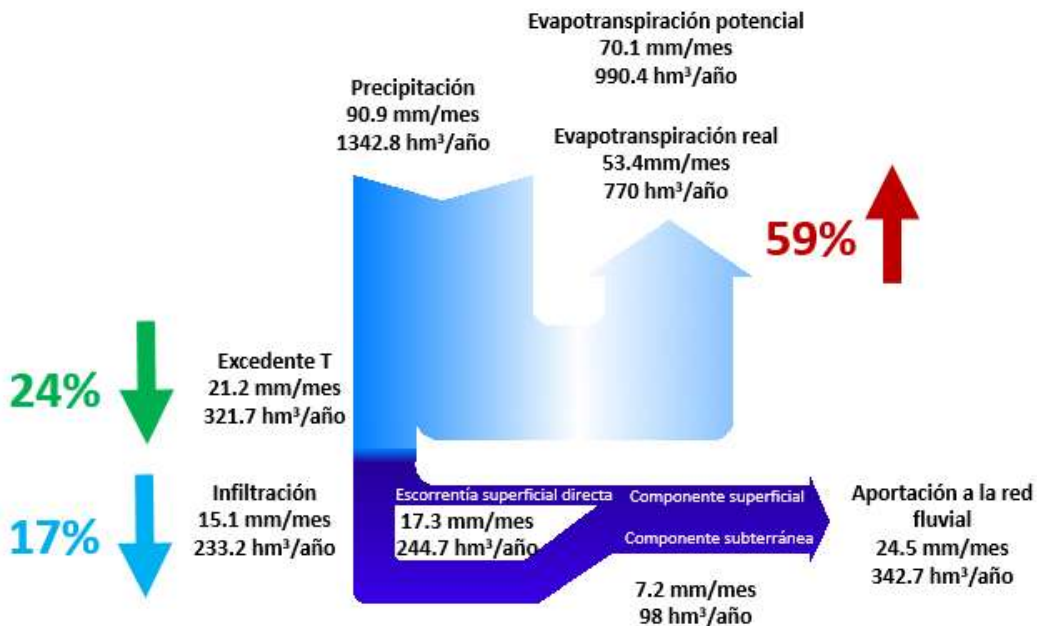


Figura 7.81 Balance de recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (2039-2099) obtenido con el modelo HBV para el escenario de cambio climático RCP 4.5

Los balances presentados en las figuras 7.76, 7.77 y 7.78, permiten cuantificar la afectación sobre las variables del ciclo hidrológico debido a las alteraciones climáticas que se tienen planteadas para el escenario RCP 4.5 para los periodos de 2015-2039 y 2075-2099. Se observa que debido al aumento de la temperatura, la evapotranspiración real para la cuenca irá en aumento a razón de un 1% del total de las aportaciones. Lo que significa que menos agua estará disponible en los cauces.

De esta manera fueron analizados cada uno de los balances obtenidos para cada escenario climático propuesto. Como resultados generales se observa que para el periodo de 2015-2039, la disponibilidad de los recursos hídricos aumenta en un 3% promedio para todos los escenarios, esto se debe a que las precipitaciones promedio se incrementan para este periodo y las temperaturas que se alcanzan no son lo suficientemente mayores para provocar disminución en la disponibilidad del recurso. Aunque los volúmenes de disponibilidad aumentan al igual que las temperaturas, el porcentaje de agua que se evapotranspira también es mayor, aunque en el escurrimiento final no se ve reflejada esta afectación debido a todas las variables que son consideradas por el modelo. Hay que considerar que si se lograra mantener las temperaturas promedio actuales para ese periodo, el volumen de agua evapotranspirado debido al incremento de las temperaturas, probablemente se convertiría en un volumen de agua disponible para ser utilizado.

Para el periodo 2075-2099 la disponibilidad de agua en la cuenca sí se verá probablemente disminuida debido a los efectos del cambio climático, esto de acuerdo con los resultados obtenidos de los modelos hidrológicos. El escenario RCP 8.5 para este periodo pronostica una disminución promedio en los recursos hídrico de un 23%, siendo éste el escenario más crítico. El aumento de las temperaturas afecta de manera considerable la disponibilidad de agua en la zona de estudio.

7.8.4 Modelación de los escurrimientos utilizando la NOM-011-CONAGUA-2015

La obtención de la disponibilidad hídrica media anual para la cuenca del río Tuxpan se realizó para cada uno de los escenarios y periodos, utilizando cada una de

las herramientas que se han descrito anteriormente, incluyendo la NOM.011-CONAGUA-2015.

Siguiendo la metodología marcada por la Comisión Nacional del Agua en la NOM-011-CONAGU-2015, se pueden determinar los escurrimientos superficiales para la cuenca considerando la probable afectación del cambio climático, esto se logra aplicando las expresiones especificadas en la Norma pero utilizando las series de precipitación y escurrimiento que se obtuvieron para los modelos hidrológicos.

Al introducir estos datos en la metodología, es necesario determinar de nueva cuenta los mapas de Isoyetas para cada escenario (Fig. 7.81) al igual que las precipitaciones anuales.

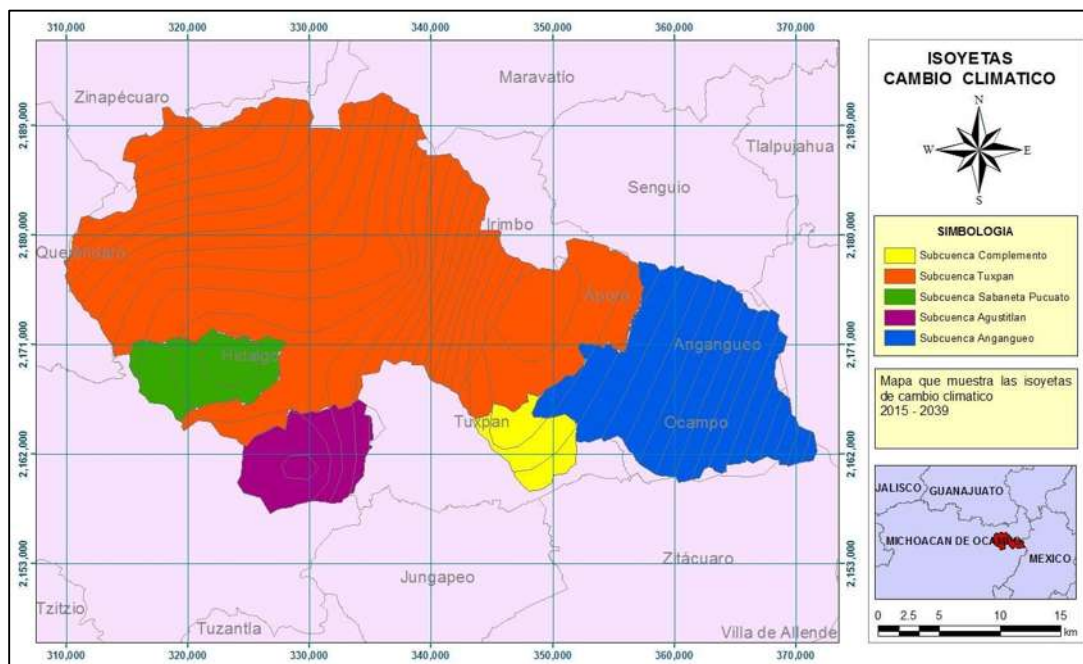


Figura 7.82 Mapa de isoyetas para la cuenca del río Tuxpan. Periodo 2015-2039 para el escenario RCP 6.0.

Tabla 7.36 Proyección del escurrimiento promedio anual por subcuenca para el periodo de 2015-2039 considerando la variable de cambio climático bajo el escenario RCP 6.0.

SUBCUENCA	Parametro k	Precipitación media anual (mm)	Área (km ²)	Ce	Volumen medio de escurrimiento natural (hm ³)
Anganguero	0.27	1029	239	0.18	43.8
Tuxpan	0.26	1039	783	0.18	142.4
Agustitlan	0.23	1039	71	0.17	12.3
Subaneta_Puc	0.22	1038	64	0.15	10.0
Complemento	0.27	1012	39	0.17	6.7
TOTAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL EN LA CUENCA =					215.1

El escurrimiento promedio anual para el periodo de 2015-2039 es de 215.1 hm³. Se presenta una disminución de 1 hm³/año respecto del periodo histórico.

La tabla 7.38 muestra una comparativa entre los escurrimientos promedio anuales obtenidos para cada uno de los escenarios de cambio climático y para el periodo histórico, bajo la concepción de las ecuaciones de cada modelo utilizado en este trabajo.

Tabla 7.37 Comparativa entre los escurrimientos calculados con los diferentes modelos hidrológicos y la NOM-011-CONAGUA-2015, para el periodo histórico y las proyecciones de cambio climático.

Modelo	Aportación total (hm ³ /año)						
	1952-2010	2015-2039			2075-2099		
	REAL	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Témez distribuido	457	477	493	483	460	473	371
Témez agregado	478	478	494	498	454	472	352
HBV	447	468	483	486	450	469	365
NOM-011	217	219	215	216	211	212	196



Figura 7.83 Comparativa de los volúmenes obtenidos con los diferentes modelos hidrológicos para los escenarios actual y de cambio climático, para los periodos de 1952-2010 (actual), 2015-2039 y 2075-2099 (proyecciones de cambio climático).

Los modelos hidrológicos arrojan valores más o menos similares entre sí, mientras que la Norma calcula aproximadamente un 50% menos de las aportaciones promedio registradas por los modelos hidrológicos.

Los valores de las aportaciones obtenidas con los modelos hidrológicos de Témez y HBV, bajo sus diferentes concepciones adoptadas por las herramientas bajo las cuales se encuentran programados, dejan ver que las variaciones entre los resultados finales son más o menos similares, mientras que si se comparan cualquiera de estos resultados con los obtenidos con la Norma las diferencias entre ellos ascienden a un 50%, siendo esta última la que se queda por debajo.

Se compararon los resultados obtenidos con los modelos hidrológicos HBV y Témez en los puntos donde se encuentran las estaciones hidrométricas de gasto, éstas miden los caudales que pasan por el río en ese punto. Los resultados de las aportaciones calculadas por los modelos variaron alrededor de un $\pm 5\%$ respecto de los aforados en las estaciones hidrométricas (ver tabla 7.38).

Tabla 7.38 Comparativa entre las aportaciones obtenidas con los modelos hidrológicos y las estaciones hidrométricas de gasto.

Valores en hm³/año

	AFORADO	TEMEZ	HBV
1961	370.1	387.6	350.3
1962	377.6	362.2	345.9
1970	385.4	403.0	392.5
1975	453.4	484.7	470.1
1976	471.4	501.6	483.6

La NOM-011 establece que está permitido utilizar otras metodologías para la obtención de los escurrimientos en una cuenca. Al utilizar modelos hidrológicos como el de Témez, se encontró que éstos calculan aproximadamente un 50% más de los escurrimientos que se calculan en la NOM-011. La tabla siguiente muestra los escurrimientos calculados con los diferentes métodos, donde se puede apreciar la diferencia que existe entre la NOM-011 y los modelos hidrológicos.

Tabla 7.39 Resumen de aportaciones en la cuenca del río Tuxpan para el periodo (1952-2010) para cada uno de los modelos utilizados.

Modelo	Aportación total (hm ³ /año)	Herramienta
Témez distribuido	457	Patrical
Témez agregado	478	Evalhid
HBV	447	Evalhid
NOM-011	217	

8 CONCLUSIONES

Se han obtenido tres tipos de conclusiones, las que tiene que ver específicamente con la aplicación de la metodología, las que abarcan los procedimientos referentes al cambio climático y las conclusiones generales.

Las conclusiones resultado de la aplicación de la metodología son las siguientes:

Existe una gran variedad de modelos hidrológicos disponibles, cada uno posee características específicas propias que hacen al modelo más, o menos complejo; lo importante aquí es que tengamos la capacidad de elegir un modelo que resulte adecuado en función de los datos que se tengan disponibles y del nivel de detalle que requiera el estudio que se pretenda realizar.

La etapa de gestión de datos es fundamental para la etapa de modelación de la cuenca y todo lo que ésta implica, es por ello que se debe garantizar que los datos utilizados sean tratados con los procedimientos adecuados y que la validación estadística de éstos sea un requisito indispensable, solo así se puede reducir el porcentaje de incertidumbre que genera la modelación hidrológica.

La información meteorológica e hidrométrica con que se cuenta en México limita en gran medida los modelos que pueden utilizarse. Es necesario llevar a cabo una actualización y revisión de la información histórica disponible para garantizar que ésta sea otorgada al público con la mejor calidad posible.

La etapa de calibración de los modelos hidrológicos, es por mucho la que requiere mayor atención y tiempo. Dependiendo de la calibración que se logre será la calidad de los resultados que arrojen los modelos. Es tarea del modelador asegurar que la calibración sea la mejor que pueda obtenerse. Es indispensable que en esta etapa se utilicen técnicas estadísticas e indicadores de ajuste que permitan calificar el grado de acercamiento entre los datos simulados y los observados.

La etapa de validación del modelo es fundamental en la metodología de la evaluación de los recursos hídricos en una cuenca, en ella se asegura que la etapa de

calibración de modelo es aceptable y, por consecuente que los resultados que obtengamos de los modelos tienen un respaldo.

Los modelos hidrológicos permiten obtener datos simulados de los procesos del ciclo del agua, lo que muestra herramientas valiosas para llevar a cabo una mejor administración de los recursos hídricos en una cuenca

La metodología establecida en la NOM-011-CONAGUA-2015, es un procedimiento diseñado principalmente para cuencas no aforadas. Al no contar con otro tipo de herramientas ni elementos que puedan ser utilizados para la obtención de la disponibilidad hídrica media anual en una cuenca, la Norma es un procedimiento que puede seguirse; sin embargo si se tiene acceso a herramientas como los modelos hidrológicos que pueden dar resultados más cercanos a la realidad que los obtenidos en la Norma, deben ser utilizados no sin antes haber evaluado la confiabilidad del modelo matemático que se desee utilizar.

Los modelos hidrológicos utilizados muestran resultados de la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca muy similares entre sí, la complejidad de cada modelo tiene que ver con la fineza que se requiera para el estudio que se pretende hacer; queda demostrado, de acuerdo con la tabla de comparativas entre las estaciones hidrométricas y los gastos obtenidos por los modelos hidrológicos, que éstos son una buena herramienta para ser utilizada en cuencas Mexicanas al presentar valores cercanos a los aforados en los puntos de medición reales para un mismo periodo de tiempo.

El modelo de simulación hidrológica y calidad del agua PATRICAL (Pérez, 2005) es un simulador mensual del ciclo hidrológico con calidad del agua que se apoya en un Sistema de Información Geográfica (SIG), para reproducir fundamentalmente las componentes superficiales del ciclo hidrológico, mientras que el comportamiento hidrogeológico se reproduce mediante modelos de acuíferos unicelulares conectados entre sí. Este modelo analiza de forma integrada tanto el subsistema superficial como el subsistema subterráneo y presta especial atención a las relaciones entre ambos subsistemas, las relaciones río-acuífero y a las transferencias de agua que se producen entre los diferentes acuíferos.

El módulo EVALHID, es una herramienta informática que permite la modelación de los escurrimientos superficiales bajo una interfaz gráfica sencilla de manejar, tiene la ventaja de que alberga varios modelos del tipo lluvia-escurrimiento. Esta herramienta puede trabajar en conjunto con un Sistema de Soporte a la Decisión (Plataforma Aquatool).

Las conclusiones que implican los procedimientos referentes al cambio climático:

El cambio climático es una variable que debe ser incorporada en las líneas de investigación en México, ya que éste afectará a varios sectores importantes para la sociedad, tal es el caso de los recursos hídricos.

La metodología que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 permite la aplicación de la variable de cambio climático, sin embargo los resultados son poco confiables de acuerdo con lo obtenido en los modelos hidrológicos.

Si la diferencia que existe entre los modelos hidrológicos y la Norma la trasladamos a la modelación de las aportaciones pero aplicando variables como el cambio climático, los resultados que arrojan los modelos son mucho más impactantes que los arrojados por la Norma. Si bien es cierto que la metodología planteada en la NOM-011-CONAGUA-2015 no indica nada acerca del cambio climático, la posibilidad de utilizarla está presente y deja ver la sensibilidad que muestra ante una variable tan importante como es la precipitación, ya que los resultados obtenidos con los datos de cambio climático muestran que para el periodo de 2015-2039 la disminución del recurso hídrico es de 1 hm³/año, mientras que los modelos hidrológicos marcan un disminución de 10 hm³/año para el mismo periodo.

Es muy importante señalar que los resultados obtenidos de la modelación con cambio climático son proyecciones bajo los diferentes escenarios climáticos propuestos, más no son resultados contundentes; sin embargo son la única herramienta con que contamos para poder evaluar este fenómeno.

Si aceptamos que el cambio climático es un proceso en marcha, y que las variables que intervienen en los sistemas hídricos dependen en gran manera de la variabilidad climática, se deberían establecer esfuerzos conjuntos para desarrollar estudios de manera integral que ayuden a planificar los recursos hídricos para el futuro. En México han sido pocos los estudios que se han realizado para conocer los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos, por lo que se requiere continuar con este tipo de trabajos.

Actualmente y con base en los incrementos de la temperatura y a los cambios en la precipitación en los últimos años, se trata de incorporar en los estudios de los recursos hídricos la incertidumbre del cambio climático y desarrollar herramientas que sirvan para planificar, diseñar, gestionar y operar los recursos y las obras hidráulicas en el futuro para satisfacer las demandas de agua que pudieran presentarse con los cambios climáticos.

Los modelos climáticos son la herramienta más confiable para la investigación del clima, sus fluctuaciones y variaciones; son incluso las únicas herramientas que se tienen actualmente a nivel mundial.

Actualmente, los MCG incluyen además modelos de funcionamiento de los océanos, denominados modelos de circulación general acoplados océano atmósfera (MCGAO-A). Los MCG son actualmente las únicas herramientas de que se dispone para obtener los patrones de respuesta climática ante diversas acciones exógenas.

Para responder a las preguntas que la posibilidad de un cambio climático plantea, se requieren resoluciones temporales y espaciales cada vez más detalladas, así como información sobre un mayor número de variables (evapotranspiración, temperaturas máximas y mínimas, escorrentías, etc.). Por esta razón se están desarrollando modelos climáticos regionales. En la actualidad sólo se dispone de escenarios regionales obtenidos a partir de los resultados de uno o varios MCG con todas las limitaciones y cautelas que ello implica.

En cuanto a las conclusiones generales:

El Sistema Cutzamala, el cual abastece a once delegaciones del Distrito Federal y a once municipios del Estado de México, es uno de los sistemas de abastecimiento de agua potable más grande del mundo, no solo por la cantidad de agua que suministra (aproximadamente 485 millones de metros cúbicos anualmente) , sino también por el desnivel (1,100 m) que vence.

La cuenca del río Tuxpan sufrirá impactos por el cambio climático, los cuales se verán reflejados en la disminución en las aportaciones que se entregan al sistema Cutzamala año con año.

El aumento en las temperaturas para la cuenca del río Tuxpan traerá consecuencias negativas para especies como la mariposa Monarca. Esta especie busca en los bosques mexicanos las condiciones ideales para poder reproducirse; al aumentar las temperaturas, las condiciones climáticas se ven modificadas y puede existir la posibilidad de que la especie deje de habitar los llamados Santuarios en Michoacán. Para poder hacer conclusiones más detalladas sobre esta especie es necesario llevar a cabo estudios que vayan enfocados hacia sus condiciones de vida.

Diversos usos en la cuenca del río Tuxpan se verán afectados por las variaciones del clima, ocasionadas por el cambio climático, esta afectación dependerá de la distribución que se haga del recurso hídrico en la cuenca. De acuerdo con los balances hidrológicos obtenidos, la evapotranspiración es el elemento del ciclo del agua que mayor variabilidad presenta ante el cambio climático, esto se debe a que depende de las temperaturas y de la cantidad de lluvia en la zona, por lo que la demanda agrícola requerirá de un mayor suministro.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Almanza, J., Sánchez, S. y Hernández, M (2012). **Gestión de datos meteorológicos**. En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica (Acapulco, Guerrero).
2. Barros V., Menéndez Á., Nagy G. 2005. **El cambio climático en el río de la plata**. Proyecto "Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), START-TWAS-UNEP.
3. Burt W.V., 1958. **Heat budget terms for Middle Snake River Reservoir**. In **Water temperature studies on the Sanke river**, Tech. Rep. 6, U.S. Fish and Wildlife Serv, Washington, D.C.
4. Cárdenas M. J., Sánchez T. G. 2010. **México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación**. Pp 26-29.
5. Ceballos, A., Morán, E., Luengo, M. A., y Llorente J. M., **Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: The south-west sector of the Duero river basin (Spain)**. Journal of Hydrology (2008) 351, 126–138. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.004
6. CEDEX (1998). **Estudio Sobre el Impacto Potencial del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Demandas de Agua de Riego en Determinadas Regiones de España**. Informe técnico para el Ministerio de Medio Ambiente de España. Madrid.
7. CLICOM (2010) **Climating Computing Program**. Base de datos Meteorológicos, Servicio Meteorológico Nacional, México.
8. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). 2012. México **Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático**. Primera edición: ISBN: 978-607-8246-50-2.
9. **CONAGUA. 2012. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS**. Sitio web: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20 BANDAS](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS) (Consulta: Julio 2014)
10. Delgado G.C., Gay C., Imaz M., y Martínez M.A. **México frente al cambio climático. Retos y oportunidades**.
11. Drust, A. S., 2013. **Análisis de eventos hidrometeorológicos extremos en México**. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, México D.F., 140 pp.

12. Estrela, T. 1992. **Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos**. Madrid, España. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación. ISSN 0211-6499; M-25. 55 pp.
13. Fernández Carrasco P. (2002). **Estudio del Impacto del Cambio Climático Sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en diecinueve cuencas en España**. Tesis Doctoral. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
14. **Gallardo C., Arribas A., Prego J.A., Gaertner M.A. y Castro M. (2001). Current climate and 2xCO₂ scenario. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 127:1659-1682.**
15. García P. D. L., 2012. **Metodología para la obtención de gastos con efecto del cambio climático para la cuenca del Río Grande de Morelia**. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán. 190 pp.
16. García P. D. L., Sánchez Q. S. T., Hernández B. J., 2012. **Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río grande de Morelia**. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.
17. Gay, C. 2003. **La Atmósfera**. Biblioteca Juvenil Ilustrada. Editorial Santillana.
18. Georgakakos, A. and H. Yao. (2000) **Climate change impacts on Southeastern U.S. basins, 1: Hydrology. Water Resources Research** (in review). U.S. Geological Survey Open-File Report 00-334, 68p.
19. Gregory, J.M., J.F.B. Mitchell, and A.J. Brady, (1997): **Summer drought innorthern midlatitudes in a time-dependent CO₂ climate experiment. Journal of Climate**, 10, 662–686.
20. Hernández B. J., Sánchez Q. S. T., Hernández H. M., 2012. **El cambio climático en la gestión hidrológica subterránea**. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.
21. Hernández L., Molina, M., Sánchez, L., Martíez M., Orozco, R., Gómez, C., **simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, Chiapas. XXII Congreso Nacional de Hidráulica (Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012)**
22. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2010. **Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio Climático**. 162 pp.

23. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. **Resumen para Responsables de Políticas, Impactos Regionales de Cambio Climático, Evaluación de la Vulnerabilidad**. Eds. Watson, R, Zinyowera, M. C., Moss R.H., y Dokken D.J. OMM, WMO, PNUMA y UNEP. 27pp.
24. IPCC, 2007: Cambio climático 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** [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
25. IPCC. 2001. “Tercer informe de evaluación”. **La base científica. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático**. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido). pp. 25 - 35.
26. López F., 2009. **Metodología para el análisis de eventos extremos de temperatura, un estudio de caso en Apizaco, Tlaxcala**. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de México. Posgrado en ciencias de la tierra, México D.F., 170 pp.
27. López P. D. C., Cavazos G. R. A., Ferriño F. A. L., Vera H. J. A., (2012). **Indicadores hidrológicos en el cambio climático en la cuenca del río pilón (México)**. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.
28. Magaña, V. y Caetano, E. 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**” UNAM. México D.F. (México). pp. 2 - 8.
29. Martínez J. y Fernández B. A. 2004. **Cambio climático una visión desde México**. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de ecología. México D.F. (México). pp. 15 - 20.
30. Martínez J., Fernández A. 2004. **Cambio climático: una visión desde México. Primera Edición**. 525 pp. México D.F. México. ISBN 968-817-704-0.
31. Morán, e., López, J.I., Ceballos A., y Vicente, S. M. **River regimes and recent hydrological changes in Duero basin (Spain)**. Journal of Hydrology 404 (2011) 241–258
32. Moreno N. 2013. **Evaluación económica de la restauración hidrológica ambiental de la microcuenca Carrillo-El Tigre en Angagueo Michoacán**. Tesis de maestría. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Edo. De México. 169pp.

33. Mundo M. M., López H. I., Lobato S. R., Montero M. M., Ramírez O. A., Patiño G. C., 2012. **Simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, Chiapas.** XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.
34. Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Hamlet, A. F., and Lettenmaier, D. P.: **Hydrologic sensitivity of global rivers to climatic change, Climatic Change**, 50, 143–175, 2001.
35. Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M., 2000. **A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques.** *International Journal of Climatology* 20, 1823–1841
36. Norma Oficial Mexicana 011-CONAGUA-2015. Comisión NACIONAL DEL Agua, 2015. Pp 20.
37. Orlando, M. R. 2010. **Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones.** México D.F. (México). pp 20 - 40.
38. **Ortiz, A., Mendoza M. E., Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la Cuenca del lago de Cuitzeo. Universidad Autónoma de México-CIGA. Portal web**
39. Osborn, T.J., M. Hulme, P.D. Jones, and T.A. Basnet, (2000). Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 20, 347–364.
40. Padilla, H. 2012. **Análisis de los deslizamientos de ladera de febrero de 2010 en la cuenca del Río el Charco, Angagueo, Michoacán.** Tesis de maestría. Facultad de filosofía y letras, Colegio de Geografía. México D.F., 144 pp.
41. Panagoulia , D. and G. Dimou, (1997) **Sensitivity of flood events to global climate change.** *Journal of Hydrology*, 191, 208–222.
42. Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., Lerma, N. **Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual técnico.** Valencia, España: Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia. 50pp.
43. Patiño G. C., Martínez A. P., 2010. **Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático.** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
44. Peixoto J. P. and Oort A. H., 1991, 520 pp., American Institute of Physics, 31.25 pb, ISBN 0-88318-712-4. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. Vol. 56, no. 8, p.1017-1019.

45. Pérez, 2005. **Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua.** Tesis Doctoral. Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Valencia del año 2.005.
46. Piani, C., Haerter, J. O., and Coppola, E.: **Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe**, Theor. Appl. Climatol., 99, 187–192, 2010a.
47. Programa de gestión del Consejo de Cuenca del Valle de México. www.igh.com.mx/ccvm
48. Quereda J., Montón, E., Escrig, J., **Escenarios climáticos y recursos hídricos sobre la región Murcia a mediados del siglo XXI.** Investigaciones Geográficas, n^a 36 (2005) pp. 5-23. ISSN: 0213-4619.
49. Quinto Informe Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Grupo II). Resumen
50. Risby, J.S. and D. Entekhabi, (1996) Observed Sacramento Basin streamflow response to precipitation and temperature changes and its relevance to climate impact studies. *Journal of Hydrology*, 184, 209–223.
51. S. Hagemann¹, C. Chen¹, D. B. Clark², S. Folwell², S. N. Gosling³, I. Haddeland⁴, N. Hanasaki⁵, J. Heinke⁶, F. Ludwig⁷, F. Voß⁸, and A. J. Wiltshire⁹. **Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models.** 3, 1321–1345, 2012
52. Sailor D.J.y Li X. (1999). A semiempirical downscaling approach for predicting regional temperature impacts associated with climatic change. *Journal of Climate* 12:103 –114.
53. Salathé, E. P., Jr., P. W. Mote, and M. W. Wiley. 2007. **Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States Pacific Northwest.** *International Journal of Climatology* 27:1611–21.
54. Stacy M. Langsdale, Ph.D., P.E.1; Allyson Beall, Ph.D.2; Jeff Carmichael, Ph.D.3; Stewart J. Cohen, Ph.D.4; Craig B. Forster, Ph.D.5; and Tina Neale6. **Exploring the Implications of Climate Change on Water Resources through Participatory Modeling: Case Study of the Okanagan Basin, British Columbia.** *Journal Of Water Resources Planning And Management* © Asce / September/October 2009 / **373**
55. Stott, P.A. and S.F.B. Tett, 1998: Scale-dependent detection of climate change. *Journal of Climate*, **11**, 3282–3294.

56. Témez, J.R. (1977). **Modelo matemático de transformación precipitación-aportación**. ASINEL, 1977.
57. Torres, E., Fernández D.S., Oropeza, J.L., Y Mejía, E. **CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA “EL TEJOCOTE”, ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO**. Redalyc Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
58. Trigo, R.M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T.J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S., Esteban- Parra, M.J., 2004. **North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula**. International Journal of Climatology 24, 925–944. doi:10.1002/joc.1048.
59. Walpole R.E., Myers H. R. and Myers S.L., 1999. Probabilidad y estadística para ingenieros. Sexta edición. Prentice-Hall Hispanoamericana; S.A. México. ISBN 970-17-0264-6
60. Westmacott , J.R. and D.H. Burn, (1997). Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, 202, 263–279.
61. Wilks, D. S. 2006. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, second ed. Academic Press**.
62. Zhang, X-H., J.M. Oberhuber, A.Bacher, and E. Roeckner, 1998. Interpretation of interbasin exchange in an isopycnal ocean. *Climate Dynamics* 14, 725-740.
63. Zhu T., M.W. Jenkins y J.R. Lund. 2006. **Estimated impacts of climate warming on California water availability under twelve future- climate scenarios**. PIER Project Report Number 2006-003. California Energy Commission. 60 pp.

ANEXO 1. MÉTODO DE THORNTHWAITE

Los cálculos de Thornthwaite (1948) esta basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días e mes. El método es muy empleado en Hidrología.

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial, a. Se proponen las siguientes formulas:

$$e = 16 \cdot (10 \cdot t_m / I)^a \quad (1)$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar en (mm (mm/mes)

t_m : temperatura media mensual en °C

I : índice de calor, donde

$$I = \sum i_j ; j = 1, \dots, 12$$

Que se calcula a partir del índice de calor mensual, i, como suma de los doce índices de calor mensuales.

$$i_j = (t_m / 5)^{1.5M} \quad (2)$$

a: parámetro que se calcula, en función de la siguiente expresión:

$$a = 0,000000675 \cdot I^3 - 0,0000771 \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239 \quad (3)$$

Para valores de temperaturas media mensuales superiores a 26.5 °C, la ETP sin ajustar se obtiene directamente de tablas elaboradas para este método (Aparicio, 1987).

ANEXO 2. MÉTODOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN

Los métodos utilizados fueron los siguientes:

➤ 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:

$$P_f = P_a + I_n$$

DONDE:

P_f = POBLACIÓN FUTURA

P_a = POBLACIÓN ACTUAL

I = INCREMENTO PROMEDIO: $\sum I_D / n_D$

$I_D = (P_D - P_{(D-1)}) / N$

DONDE:

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 $P_{(D-1)}$

➤ 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.

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

DONDE:

P_f = POBLACIÓN FUTURA

P_a = POBLACIÓN ACTUAL

r = TASA DE CRECIMIENTO

n = AÑOS TRANSCURRIDOS

$$(1 + r) = (P_D / (P_{(D-1)}))^{(1/n)}$$

DONDE:

P_D = POBLACIÓN DE CADA DECENA

$P_{(D-1)}$ = POBLACIÓN DE LA DECENA ANTERIOR

n = AÑOS TRANSCURRIDOS DESDE P_D Y $P_{(D-1)}$

➤ Método de los mínimos cuadrados:

Sustituyendo en la fórmula del método aritmético; $p_f = p_a + i_n$, lo siguiente:

$$Y_c = P_f;$$

$$a = I;$$

$$X = N;$$

$$b = P_a$$

Obtenemos:

$$Y_c = b + ax$$

Que es la función de regresión lineal, para la línea recta, donde tenemos las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum Y_o = a \sum X_o + nb$$

$$\sum X_o Y_o = a \sum X_o^2 + b \sum X_o$$

Resolviendo las ecuaciones para "a" Y "b" obtenemos las siguientes formulas:

$$a = (n \sum X_o Y_o - \sum X_o \sum Y_o) / (n \sum Y_o^2 - \sum X_o^2)$$

$$b = ((\sum Y_o) / n) - ((\sum X_o) / n) a$$

➤ Método de la curva exponencial

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

$$a = P_a$$

$$b = (1 + r) :$$

$$Y = P_f ;$$

$$t = N$$

Obtenemos:

$$Y = a b^t$$

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

$$\sum \log Y_o = n \log a + \log b \sum t$$

$$\sum t \log Y_o = \log a \sum t + \log b \sum t^2$$

Resolviendo las ecuaciones para "log a" Y "log b" obtenemos las siguientes formulas:

$$\log b = (n \sum t \log Y_o - \sum t \sum \log Y_o) / (n \sum t^2 - \sum t^2)$$

$$\log a = ((\sum \log Y_o) / n) - ((\sum t) / n) \log b$$

ANEXO 3. MÉTODO PARA ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES: INVERSO DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA AL CUADRADO

Previo al llenado es necesario determinar la matriz de distancias euclidianas de todas las estaciones de la zona en estudio, así como determinar los estadísticos básicos de las series meteorológicas originales (sin llenado) de la zona en estudio.

La distancia euclidiana es la distancia ordinaria deducida a partir del teorema de Pitágoras, para determinar esta distancia es a partir de las coordenadas de cada estación y su respectiva elevación hasta la otra estación. Obteniéndose por tanto una matriz de distancias euclidianas de las estaciones principales y secundarias. De tal forma que la ecuación de la distancia Euclidiana queda de la siguiente manera:

$$\text{Dist. Euclidiana} = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]}$$

Siendo

x_i = Coordenada x estación i; x_j = Coordenada x estación j

y_i = Coordenada y estación i; y_j = Coordenada y estación j

z_i = Elevación estación i; z_j = Elevación estación j

Una vez determinada esta distancia se calcula su inverso y se prepara la matriz de inverso de la distancia euclidiana que permita manejar estos valores.

Se obtienen los valores estadísticos que nos permitan determinar la variación al inicio (antes del llenado) y al final del llenado de las series, de tal manera que con estos valores es posible evaluar la variación de los coeficientes y por tanto la confiabilidad del llenado. Entre los estadísticos básicos se sugieren la media, la variación y el sesgo.

Para el llenado de datos es necesaria una inspección cuidadosa de la matriz de correlación, ubicación espacial de las estaciones respecto a la estación a llenar, y que las estaciones puedan llenar los datos faltantes, entre otros. De este análisis es posible identificar que estaciones pueden llenar un intervalo de datos faltantes y otras estaciones pueden llenar otro intervalo de datos faltantes. Esta parte del proceso de llenado es subjetiva y se basa fuertemente de la experiencia de la persona que realiza

el análisis, es importante hacer notar que sigue dos condiciones importantes: la cercanía de las estaciones y la correlación con criterio de significación.

Con los datos de la matriz de la inversa de la distancia y la matriz de correlación donde son útiles solo las estaciones con correlación mayor a 0.75, se procede a determinar la ecuación de llenado para cada intervalo de datos faltantes a llenar de la estación principal, hay que cuidar que las estaciones seleccionadas para llenar contengan datos para el dato o intervalo de datos faltantes.

La ecuación de llenado del dato faltante requiere identificar el peso de cada estación. Este peso requiere el cálculo de suma del inverso de la distancia Euclidiana al cuadrado, de las estaciones útiles a llenar el intervalo de datos faltantes (es decir cuentan con información en el intervalo faltante de la estación a llenar). Se obtiene el peso de cada estación útil en el llenado, dividiendo el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado de la estación a utilizar para llenar entre la suma del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado. Este peso se multiplicará por el valor de la precipitación en dicho periodo.

Y sumando el peso obtenido de las otras estaciones, se obtendrá el valor estimado de uno.

$$\text{Peso estación } i = \frac{(\text{Inv. Dist. Euclidiana est } i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Inv. Dist. Euclidiana})^2}$$

$$\text{Dato faltante} = \sum_{i=1}^n [\text{peso estación } i * \text{precipitación } i]$$

Siendo

$i = 1, \dots, n$. Estaciones útiles a llenar la estación con vacíos Si las estaciones utilizadas a llenar tuviesen vacíos en el periodo de tiempo de vacíos de la estación a llenar, se provoca un error en la determinación del dato faltante.

Si existiese una sola estación con alta correlación con la estación a llenar, se recomienda hacer uso del método de correlación lineal.