



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMÁTICA
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO
ZAHUAPAN,
ESTADO DE TLAXCALA, CONDICIÓN
ACTUAL Y ESCENARIOS POTENCIALES.**

LUIS ENRIQUE HERNÁNDEZ SALINAS

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: Caracterización hidroclimática de la subcuenca del río Zahuapan, Estado de Tlaxcala, condición actual y escenarios potenciales, realizada por el alumno: Luis Enrique Hernández Salinas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

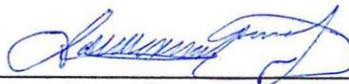
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



Dra. Antonia Macedo Cruz

ASESOR



Dr. David Cristóbal Acevedo

ASESOR



Dr. Martín A. Bolaños González

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2021

CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMÁTICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, ESTADO DE TLAXCALA, CONDICIÓN ACTUAL Y ESCENARIOS POTENCIALES.

Luis Enrique Hernández Salinas, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La disponibilidad de información sobre los efectos de las actividades humanas a largo plazo, como lo son los impactos potenciales del fenómeno de cambio climático sobre los recursos hídricos, es de gran importancia en la generación de planes y programas de desarrollo territorial, por ello la presente investigación pretende contribuir a identificar la dinámica hidrológica general de la subcuenca del río Zahuapan, empleando el método del Balance Hídrico-Climático de Thornthwaite y Mather para un estado base con promedios históricos, periodo 1984-2013; y para los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5 bajo los Modelos Generales de Circulación de la Atmósfera GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR, hacia los horizontes cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099). El modelo fue desarrollado en código de programación MATLAB para realizar los cálculos a partir de archivos TIFF con resolución espacial de 1 ha por celda, y calibrado mediante comparativa con los escurrimientos mensuales reportados por la estación hidrométrica 18140-Xicotzingo para el intervalo 1989-1997. Los resultados del balance hídrico para la subcuenca en el estado base estiman un volumen total anual de precipitación de 1,193.76, déficit de humedad de 212.54 y excedentes de 288.19 hm^3 ; bajo los escenarios evaluados se prevén incrementos promedio del volumen anual de déficit en el horizonte cercano de 42.9 y 33.5 % y de 76.3 y 116.1 % hacia el horizonte lejano, y reducciones en los excedentes del 26.6 y 22.5 % hacia el horizonte cercano y de 35.6 y 50.4 % en el lejano para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. Las mayores reducciones en precipitación e incremento del déficit hídrico se concentran en los valles de las regiones norte y sur-suroeste, mientras que aumentos en los excedentes de humedad se manifiestan en las zonas serranas en los extremos norte y oeste de la subcuenca, y en la superficie del Parque Nacional La Malinche.

Palabras clave: río Zahuapan, cambio climático, Balance Hídrico-Climático, cuenca hidrográfica, Thornthwaite-Mather, cambio de uso de suelo, Sistemas de Información Geográfica.

HYDROCLIMATIC CHARACTERIZATION OF THE ZAHUAPAN RIVER SUB-BASIN, STATE OF TLAXCALA, CURRENT CONDITION AND POTENTIAL SCENARIOS.

**Luis Enrique Hernández Salinas, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021**

ABSTRACT

The availability of information on the long-term effects of human activities, such as the potential impacts of the climate change phenomenon on water resources, is of great importance in the generation of territorial development plans and programs. This research aims to contribute to identifying the general hydrological dynamics of the Zahuapan river sub-basin, using the Thornthwaite and Mather Water-Climate Balance Method for a base state with historical averages, period 1984-2013; and for the climatic scenarios RCP4.5 and RCP8.5 under the General Atmospheric Circulation Models GFDL-CM3, HADGEM2-ES and MPI-ESM-LR, towards the near (2015-2039) and far (2075-2099) horizons. The model was developed in MATLAB programming code to perform calculations from TIFF files with spatial resolution of 1 ha per cell, and calibrated by comparison with the monthly runoff reported by the hydrometric station 18140-Xicotzingo for the 1989-1997 interval. The results of the water balance estimate a total annual volume of precipitation of 1,193.76, a humidity deficit of 212.54 and a surplus of 288.19 hm³ for the sub-basin in the base state. Under the evaluated scenarios, average of water balance increases in the annual volume of deficit in the near horizon are 42.9 and 33.5% and of 76.3 and 116.1% towards the far horizon, and reductions in surpluses of 26.6 and 22.5% towards the near horizon and of 35.6 and 50.4% in the far horizon for scenarios RCP4.5 and RCP8.5, respectively. The greatest reductions in precipitation and increased water deficit are concentrated in the valleys of the north and south-southwest regions, while increases in excess moisture are manifested in the mountainous areas in the extreme north and west of the sub-basin, and in the La Malinche National Park area.

Keywords: Zahuapan river, Climate change, Water-Climate Balance, Hydrographic basin, Thornthwaite-Mather, Land use change, Geographic Information Systems.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

A todos los miembros del Posgrado en Hidrociencias, por su apoyo y enseñanzas durante mi estadía.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para poder realizar mis estudios de posgrado y esta investigación.

A mi consejera, la Dra. Antonia Macedo Cruz, así como al Dr. Martín A. Bolaños González, Dr. David Cristóbal Acevedo y Dr. Alex E. Rico Sánchez, por su tiempo, compromiso y ayuda.

Al Dr. Leonardo Tijerina Chavez[†] por su atención, guía e inmenso apoyo durante el desarrollado de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres, María Salinas y Adrián Hernández, por el regalo de la vida, el apoyo incondicional y todos sus esfuerzos para permitir nuestro desarrollo, así como la guía a ser personas de bien.

A mis hermanos, José Manuel y Gabriel, quienes con su ejemplo y empeño siempre me han motivado.

A Diana Rodríguez, mi amiga y compañera, quien me ha apoyado y ha estado ahí para confiar en mí incluso cuando yo no lo hacía, siempre agradecido.

A las familias Hernández Cuahquentzi y Salinas Rivera por el afecto y aliento que siempre me han proporcionado.

A la familia Rodríguez López por su apoyo, el haberme aceptado y hacer sentir como en casa.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	xviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1. Planteamiento del problema.....	4
2.2. Alcance y delimitación de la investigación.....	4
2.3. Hipótesis.....	5
2.4. Objetivo general	5
2.5. Objetivos particulares.....	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. Cuenca hidrográfica	5
3.2. Fenómeno de cambio climático.....	8
3.2.1. Escenarios de cambio climático.....	9
3.2.2. Impacto del cambio climático en los recursos hídricos	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4.1. Descripción del área de estudio.....	18
4.1.1. Ubicación geográfica	19
4.1.2. Localización política.....	20
4.2. Caracterización de la subcuenca	22
4.2.1. Fisiografía	23
4.2.2. Unidades climáticas	24
4.2.3. Edafología.....	25
4.2.4. Descripción hidrológica	27
4.2.5. Uso de suelo y vegetación.....	30
4.2.6. Áreas naturales protegidas en la zona de estudio.....	32

4.2.7.	Uso agrícola de la tierra	33
4.2.8.	Uso potencial del suelo	38
4.2.9.	Población.....	41
4.3.	Delimitación de la cuenca hidrográfica.....	43
4.3.1.	Modelos de altimetría	44
4.3.2.	SWAT	45
4.3.3.	Ejecución de la delimitación automática	46
4.4.	Análisis morfométrico.....	50
4.4.1.	Área y perímetro de la cuenca	50
4.4.2.	Forma de la cuenca	51
4.4.3.	Aspectos lineales del sistema de cauces	53
4.4.4.	Parámetros de relieve	59
4.5.	Comportamiento histórico de variables climáticas y bajo escenarios de cambio climático para diversas estaciones climatológicas	65
4.6.	Balance hidrológico de Thornthwaite y Mather.....	74
4.6.1.	Generación del modelo y calibración	80
4.6.2.	Balance hidrológico del estado base	102
4.6.3.	Uso de escenarios de cambio climático	106
4.7.	Clasificación climática por índice de humedad de Thornthwaite	107
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	109
5.1.	Cambio de uso de suelo histórico en la subcuenca	110
5.2.	Impacto del cambio de uso de suelo sobre la capacidad de retención de humedad	114
5.3.	Estado hidrológico actual de la subcuenca.....	115
5.4.	Balances bajo escenarios de cambio climático	116
5.4.1.	Precipitación	126
5.4.2.	Temperatura media	129
5.4.3.	Evapotranspiración potencial.....	131
5.4.4.	Evapotranspiración real	133
5.4.5.	Almacenamiento en el suelo	134
5.4.6.	Déficit	136

5.4.7. Exceso.....	138
5.4.8. Escorrentías.....	140
5.5. Impacto sobre las distintas coberturas vegetales.....	142
6. CONCLUSIONES.....	147
7. RECOMENDACIONES.....	149
8. LITERATURA CITADA.....	150
ANEXOS.....	159
ANEXO A: GRÁFICOS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA CADA ESTACIÓN EVALUADA.....	159
ANEXO B: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DESARROLLADO PARA EL CALCULO DEL BALANCE HÍDRICO.....	170
ANEXO C: MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ALTERACIONES PROMEDIO EN VARIABLES HIDROLÓGICAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA SUBCUENCA.....	174

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1.- Municipios dentro del área de la subcuenca.	21
Cuadro 4.2.- Composición Fisiográfica de la subcuenca del río Zahuapan.....	24
Cuadro 4.3.- Climas presentes en la subcuenca del río Zahuapan.....	25
Cuadro 4.4.- Grupos Principales de Suelos presentes en la subcuenca del río Zahuapan.	26
Cuadro 4.5.- Descripción del Uso de Suelo y Cobertura Vegetal de la subcuenca del río Zahuapan.....	30
Cuadro 4.6.- Áreas Naturales Protegidas de Carácter Estatal en la subcuenca del río Zahuapan.....	33
Cuadro 4.7 Áreas Naturales Protegidas de Carácter Federal en la subcuenca del río Zahuapan.....	33
Cuadro 4.8.- Cultivos de riego presentes en el ciclo 2019-2020 reportados por SIAP para los municipios considerados dentro de la subcuenca del río Zahuapan.	37
Cuadro 4.9.- Cultivos de temporal presentes en el ciclo 2019-2020 reportados por SIAP para los municipios considerados dentro de la subcuenca del río Zahuapan.....	38
Cuadro 4.10.- Desarrollo Agrícola Sobre Distintas Aptitudes de Suelo para Dicha Actividad.	40
Cuadro 4.11.- Uso y Cobertura Vegetal Actual en Suelos con Potencial Forestal en la subcuenca del río Zahuapan.....	40
Cuadro 4.12.- Principales descriptores de la población dentro de la subcuenca río Zahuapan.	42
Cuadro 4.13.- Ordenes de corrientes presentes en la cuenca.....	54
Cuadro 4.14.- Relaciones de bifurcación entre los órdenes de corriente.....	55
Cuadro 4.15.- Cálculo de la relación de bifurcación promedio para la cuenca.	56
Cuadro 4.16.- Longitud de cauces por su orden de corriente.	57
Cuadro 4.17.- Intersecciones contabilizadas en la malla interna de la subcuenca.....	60
Cuadro 4.18.- Intersecciones de la malla interna de la cuenca con curvas a nivel.	62
Cuadro 4.19.- Superficie de la cuenca acotada por las curvas a nivel presentes.....	63
Cuadro 4.20.- Rangos altitudinales y pendiente de segmentos del cauce principal.	65
Cuadro 4.21.- Estaciones meteorológicas consideradas para el análisis climático de la subcuenca río Zahuapan.....	67

Cuadro 4.22.- Tendencia de cambio promedio para cada escenario en la subcuenca.	70
Cuadro 4.23.- Operaciones y restricciones para el cálculo de los diferentes parámetros del balance hídrico climático.	79
Cuadro 4.24.- Ejemplo de balance hídrico, unidades en cm.	79
Cuadro 4.25.- Características físicas asignadas a los suelos presentes en la subcuenca.	86
Cuadro 4.26.- Asignación de clase textural por unidad dominante del suelo.	86
Cuadro 4.27.- Profundidades radicales máximas para cada tipo de cobertura y en función de la clase textural del suelo.	88
Cuadro 4.28.- Factor de corrección mensual para la latitud central de la subcuenca.	93
Cuadro 4.29.- Valores determinantes de la CAD con cobertura USyV Serie II - INEGI.	98
Cuadro 4.30.- Modelos de regresión lineal correspondientes al gradiente térmico por altitud en la subcuenca para el periodo 2010-2013.	105
Cuadro 4.31.- Clasificación climática de Thornthwaite por Índice de Humedad.	109
Cuadro 5.1 Comportamiento específico del cambio de superficie entre las distintas series de USyV de INEGI.	112
Cuadro 5.2 Comportamiento General del Uso de Suelo y Vegetación en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.	113
Cuadro 5.4.- Anomalía en volúmenes de precipitación esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.	128
Cuadro 5.5.- Anomalía en valores de temperatura media esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.	129
Cuadro 5.6.- Anomalía en volúmenes de evapotranspiración potencial esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.	131
Cuadro 5.7.- Anomalía en volúmenes de evapotranspiración real esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.	133

Cuadro 5.8.- Anomalía en volúmenes de agua almacenada en el suelo esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.....	135
Cuadro 5.9.- Anomalía en volúmenes de déficit de agua esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.....	136
Cuadro 5.10.- Anomalía en volúmenes de exceso de agua esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.....	138
Cuadro 5.11.- Anomalía en volúmenes de escorrentías esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.....	140
Cuadro 5.12.- Valores de referencia de Déficit y Excesos en el Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.	143
Cuadro 5.13.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP4.5 (2015-2039) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.....	144
Cuadro 5.14.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP8.5 (2015-2039) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.....	144
Cuadro 5.15.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP4.5 (2075-2099) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.....	145
Cuadro 5.16.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP8.5 (2075-2099) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.- Ubicación y aspecto de la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.	19
Figura 4.2.- División Política de la subcuenca del río Zahuapan.	22
Figura 4.3.- Fisiografía de la subcuenca del río Zahuapan.	23
Figura 4.4.- Unidades Climáticas presentes en la subcuenca del río Zahuapan.	24
Figura 4.5.- Edafología de la subcuenca del río Zahuapan.	26
Figura 4.6.- Principales cauces y cuerpos de agua en el estado de Tlaxcala.	28
Figura 4.7.- Áreas de drenaje de los cuerpos de agua dentro de la subcuenca río Zahuapan.	29
Figura 4.8.- Uso de Suelo y Vegetación en la subcuenca del río Zahuapan.	31
Figura 4.9.- Áreas Naturales Protegidas dentro de la subcuenca del río Zahuapan.	32
Figura 4.10.- Frontera agrícola Serie II - SIAP.	34
Figura 4.11.- Distritos y Unidades de Riego - CONAGUA.	35
Figura 4.12.- Uso Agrícola de la Tierra en la subcuenca del río Zahuapan.	39
Figura 4.13.- Zonas con Uso Potencial Forestal en la subcuenca del río Zahuapan.	41
Figura 4.14.- Distribución espacial del tipo de asentamientos poblacionales en la subcuenca.	43
Figura 4.15.- Interfaz del proceso de delimitación automática mediante el complemento ArcSWAT.	47
Figura 4.16.- Red de drenaje generada.	48
Figura 4.17.- Proceso de construcción de subcuencas.	49
Figura 4.18.- Cuenca y subcuencas generadas.	49
Figura 4.19.- Ordenes de corrientes presentes en la cuenca.	54
Figura 4.20.- Curva de logaritmos de relaciones de bifurcación.	56
Figura 4.21.- Curva hipsométrica desarrollada para la cuenca.	64
Figura 4.22.- Distribución espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas.	68
Figura 4.23.- Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG GFDL_CM3 en la subcuenca.	71
Figura 4.24.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG GFDL_CM3 en la subcuenca.	71
Figura 4.25.- Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG HADGEM2_ES en la subcuenca.	72

Figura 4.26.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG HADGEM2_ES en la subcuenca.	72
Figura 4.27.- Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG MPI_ESM_LR en la subcuenca.	73
Figura 4.28.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG MPI_ESM_LR en la subcuenca.	73
Figura 4.29.- Ejemplo del procesamiento de información desde archivos GeoTIFF, resolución espacial de 30" x 30".	80
Figura 4.30.- Principales unidades de suelo; Cartas 1:50,000 - INEGI.	82
Figura 4.31.- Distribución de unidades de suelo desde el HWSO y Perfiles Edafológicos Serie II - INEGI.	84
Figura 4.32.- Resultados de escorrentías simuladas contra escurrimientos aforados para la primera evaluación del código.	97
Figura 4.33.- Distribución final de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo; USyV Serie II - INEGI.	99
Figura 4.34.- Resultados de escorrentías simuladas contra escurrimientos aforados para la segunda evaluación del código.	100
Figura 4.35.- Comportamiento de las escorrentías simuladas y escurrimientos aforados en respuesta a la precipitación total en la subcuenca.	101
Figura 4.36.- Distribución de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo; Serie VI - INEGI.	103
Figura 5.1.- Modificaciones en la Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo entre las Series II y VI de INEGI.	114
Figura 5.2.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el periodo de referencia 1984-2013.	115
Figura 5.3.- Distribución de climas por índice de humedad para el estado base.	116
Figura 5.4.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo GFDL.	118

Figura 5.5.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo HADGEM.	118
Figura 5.6.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo MPI.....	119
Figura 5.7.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2015-2039).	119
Figura 5.8.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo GFDL.	120
Figura 5.9.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo HADGEM.	120
Figura 5.10.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo MPI.	121
Figura 5.11.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2075-2099).	121
Figura 5.12.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo GFDL.	122
Figura 5.13.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo HADGEM.	122
Figura 5.14.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo MPI.....	123
Figura 5.15.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP8.5 (2015-2039).	123

Figura 5.16.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo GFDL.	124
Figura 5.17.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo HADGEM.	124
Figura 5.18.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo MPI.	125
Figura 5.19.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2075-2099).	125
Figura 5.20.- Diferencia del volumen de precipitación total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.	128
Figura 5.21.- Diferencia del volumen de precipitación total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	129
Figura 5.22.- Diferencia de la temperatura media mensual promedio en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base. ..	130
Figura 5.23.- Diferencia de la temperatura media mensual promedio en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099).	130
Figura 5.24.- Diferencia del volumen de evapotranspiración potencial total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.	131
Figura 5.25.- Diferencia del volumen de evapotranspiración potencial total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	132
Figura 5.26.- Diferencia del volumen de evapotranspiración real total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base. ..	133
Figura 5.27.- Diferencia del volumen de evapotranspiración real total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	134

Figura 5.28.- Diferencia del volumen de agua almacenada en el suelo total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.....	135
Figura 5.29.- Diferencia del volumen de agua almacenada en el suelo total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.....	136
Figura 5.30.- Diferencia del volumen de déficit de agua total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.	137
Figura 5.31.- Diferencia del volumen de déficit de agua total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	137
Figura 5.32.- Diferencia del volumen de exceso de humedad total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.	139
Figura 5.33.- Diferencia del volumen de exceso de humedad total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	139
Figura 5.34.- Diferencia del volumen de escorrentía total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.	141
Figura 5.35.- Diferencia del volumen de escorrentía total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.	141

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Siglas	Significado
ALM	Variable Almacenamiento de Agua Mensual en el Suelo del Balance Hídrico
BHC	Balance Hídrico Climático
CAAS	Capacidad de Almacenamiento de Agua en el Suelo
CAD	Capacidad de Agua Disponible en el suelo
CALM	Variable Cambio de Almacenamiento de Agua Mensual en el Suelo del Balance Hídrico
CLICOM	Sistema de <i>software</i> de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas (Climate Computing Project)
CMIP5	Quinta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del IPCC
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DEF	Variable Déficit de Agua Mensual del Balance Hídrico
ESC	Variable Escorrentía Mensual del Balance Hídrico
ETP	Variable Evapotranspiración Potencial Mensual del Balance Hídrico
ETR	Variable Evapotranspiración Real Mensual del Balance Hídrico
EXC	Variable Exceso de Humedad en el Suelo Mensual del Balance Hídrico
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)
G45HC	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo GFDL-CM3 hacia el horizonte cercano (2015-2039)
G45HL	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo GFDL-CM3 hacia el horizonte lejano (2075-2099)
G85HC	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo GFDL-CM3 hacia el horizonte cercano (2015-2039)
G85HL	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo GFDL-CM3 hacia el horizonte lejano (2075-2099)
GFDL	Modelo de Circulación General GFDL-CM3. Elaborado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Estados Unidos
H45HC	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo HADGEM2-ES hacia el horizonte cercano (2015-2039)
H45HL	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo HADGEM2-ES hacia el horizonte lejano (2075-2099)
H85HC	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo HADGEM2-ES hacia el horizonte cercano (2015-2039)
H85HL	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo HADGEM2-ES hacia el horizonte lejano (2075-2099)
HADGEM	Modelo de Circulación General HADGEM2-ES. Elaborado por la Met Office Hadley – Reino Unido.

HWSD	Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo (Harmonized World Soil Database) de la FAO
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
M45HC	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo MPI-ESM-LR hacia el horizonte cercano (2015-2039)
M45HL	Escenario climático bajo RCP4.5 en el modelo MPI-ESM-LR hacia el horizonte lejano (2075-2099)
M85HC	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo MPI-ESM-LR hacia el horizonte cercano (2015-2039)
M85HL	Escenario climático bajo RCP8.5 en el modelo MPI-ESM-LR hacia el horizonte lejano (2075-2099)
MCG	Modelos de Circulación General de la Atmósfera o Modelos Climáticos Globales (sinónimos en la literatura)
MDE	Modelo Digital de Elevación
MPI	Modelo de Circulación General MPI-ESM-LR. Elaborado por el Max-Planck Institute - Alemania
PP	Variable Precipitación Mensual del Balance Hídrico
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways).
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIATL	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
SWAT	Herramienta Soil & Water Assessment Tool

1. INTRODUCCIÓN

El abasto de agua mundial para uso doméstico, industrial y agrícola depende en gran parte de los escurrimientos que son creados y regulados por las cuencas hidrográficas; sin embargo, el calentamiento global está provocando cambios en el ciclo del agua y los ecosistemas (FAO, 2017). A su vez, los impactos del cambio climático en la variabilidad del ciclo del agua pueden agravarse por distintos factores, como el aumento de la población, migración incontrolada, cambios en el uso de la tierra, extracción acelerada de aguas subterráneas, degradación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad (FAO, 2019). Por lo anterior, el estudio del medio se vuelve una de las principales herramientas para el diseño e implementación de planes de acción que le permitan ser resiliente ante dichas problemáticas.

De acuerdo con CONAGUA (2018) las cuencas hidrográficas son unidades naturales del terreno, las cuales debido a la distribución del relieve quedan definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales. Debe considerarse a una cuenca como la unidad mínima de manejo territorial, pues como indican Gaspari *et al.* (2013, p. 6): “las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, donde la disponibilidad de recursos hídrico, biológico y edáfico en una cuenca hidrográfica depende de:

- La tendencia dinámica de funcionamiento espacio - temporal;
- La influencia de tratamientos integrados de producción y protección regionales, según elementos sociales, económicos; y
- El grado de alteración ambiental y/o social.”

De manera general, una cuenca es un colector que recibe la precipitación y la transforma en escurrimientos, lo cual dependen tanto de las condiciones climáticas de la región como de las características físicas de la cuenca. Desde este punto de vista su funcionamiento está dado por su morfología, tipos de suelos, así como cobertura vegetal y uso de la tierra, de esta forma la delimitación de las cuencas hidrográficas en una región es fundamental ya que se constituyen como parte elemental de los factores que dominan su dinámica hídrica (Lexow, 2002).

La morfología regional, la cual se encuentra condicionada por los procesos de sedimentación, erosión, deposición y transporte da lugar a la existencia de cuencas hidrográficas,

donde el agua por medio de su capacidad de erosión y transporte de sedimentos, se comporta como un factor relevante en el modelado de la superficie terrestre y sus paisajes (Melo, 2003).

Los problemas actuales relacionados con el agua han incentivado la conservación y protección de bosques, y ecosistemas, donde la estructura, composición y ubicación juegan un papel fundamental en la determinación de los servicios ambientales que pueden ofrecer y a quienes se los proporciona, ya que, su presencia trae consigo la protección de la cuenca hidrográfica, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono (Pagiola *et al.*, 2006).

Es importante resaltar que analizar el territorio a nivel de cuencas es fundamental, ya que se pueden conjuntar el balance hídrico y la capacidad que tienen los ecosistemas para la provisión de un servicio ambiental. Este balance hídrico puede ser obtenido mediante distintas herramientas informáticas de modelación, las cuales utilizan las variables temporales y espaciales para simular los flujos de agua, las entradas y salidas de un área determinada, considerándose el ciclo hidrológico en todas sus etapas (Abad, 2006).

El cambio climático afectará de manera sustancial los recursos hídricos alrededor del mundo, siendo México especialmente vulnerable a los impactos de dicho fenómeno debido a su latitud, ubicación entre dos océanos y orografía accidentada (Guido-Aldana, 2017). Como consecuencia, se espera que los escurrimientos superficiales y la recarga de acuíferos se vean disminuidas, lo cual se sumará al estrés hídrico ocasionado por el crecimiento poblacional y la demanda en la producción de alimentos (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). El estudio de los impactos potenciales a nivel regional es importante en el diseño de acciones de mitigación y adaptación que permitan integrar los principios del desarrollo sustentable en los programas de ordenamiento y de crecimiento de las poblaciones.

El estudio de las variables hídricas a una mayor resolución es necesario para el diseño de obras de irrigación adecuadas que permitan obtener el mayor beneficio posible al menor costo ambiental posible, pues como precisa la UICN (2000): para mantener los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas, los gestores de recursos hídricos deben adoptar un método que trate a los recursos como parte integral de los ecosistemas, es decir, como un recurso natural limitado y un bien social, ambiental y económico cuya cantidad y calidad determinan la naturaleza de su uso. De esta manera es que los recursos hídricos deben gestionarse sobre la base de cuencas de ríos o

de drenaje de una manera integrada, con un esfuerzo continuo y decidido por mantener y restaurar el funcionamiento ecosistémico adecuado, el cual debe de igual forma apoyarse en el método de manejo participativo de vertientes el cual considera una planificación y manejo participativos democráticos.

Si centramos nuestra atención sobre la importancia que posee el gasto consuntivo de agua para la agricultura, la cual llega a representar hasta el 70% del volumen concesionado, como un ejemplo de la presión que se ejerce sobre este recurso en algunas cuencas del país, se prevé que el incremento de la superficie de agua de irrigación pueda seguir dos escenarios en el futuro próximo. Por un lado, de continuar al mismo paso que el crecimiento poblacional y poder satisfacer las necesidades de alimentos se deberá incrementar hasta en un 30% su superficie y con lo cual demandaría mayor inversión en infraestructura y con ello se generarán mayores impactos sobre los ecosistemas. Por otro lado, de mantenerse bajo las mismas técnicas y modos de producción, se conduciría a una importante escasez de alimentos y aumento en los precios, ninguno de los dos escenarios es favorable. La mejor respuesta a la problemática de estrés hídrico es mejorar las técnicas de producción con los recursos actualmente disponibles, es decir, “hacer más productiva el agua: más cosecha por gota.” (Consejo Mundial del Agua, 2020).

El presente ejercicio se desarrolla como una aproximación al comportamiento de las variables hidrológicas de la subcuenca del río Zahuapan mediante la simulación de un balance hídrico alimentado con la mayor precisión posible en cuanto a la distribución espacial de las variables meteorológicas, así como de las características edáficas y de uso de suelo presentes en el territorio. De la misma manera, este proyecto de investigación busca identificar los posibles comportamientos de los principales elementos del balance hídrico bajo escenarios de cambio climático y obtener de manera cuantitativa estimaciones que permitan modelar el funcionamiento del territorio y con ello aproximarse a la gestión sustentable de sus recursos naturales, y en cierta manera contribuir en la elaboración de planes de acción a ser considerados.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Planteamiento del problema

La escasez de información adecuada sobre los efectos de las actividades humanas sobre el entorno a largo plazo es uno de los principales problemas que enfrentan los tomadores de decisiones y los responsables de la generación de planes y programas de desarrollo. Esfuerzos tempranos como el de Mendoza *et al.* (1997) han buscado identificar el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos del país, mientras que Maderey *et al.* (2013) consideraron, entre otras, a la cuenca del río Balsas. De manera más específica, Suárez-Sánchez *et al.* (2008) modelaron la demanda hídrica bajo escenarios de cambio climático y crecimiento poblacional en la subcuenca del río Zahuapan, aunque el horizonte de evaluación fue el año 2015 por lo que dicha simulación ha quedado rebasada.

Por lo tanto, un estudio de las condiciones hidrológicas y climáticas actuales de la subcuenca del río Zahuapan permitirá reconocer el estado actual del recurso agua. Con ello se permitirá modelar la proyección de la dinámica hídrica en donde se consideren escenarios como los de cambio climático que puedan coadyuvar a la generación de un criterio fundamentado científicamente sobre el impacto del fenómeno en el territorio. Finalmente, los resultados podrán ser considerados en el diseño de acciones de mitigación y adaptación que deban seguirse para asegurar la disponibilidad de agua para sus distintos usos y que aseguren la protección del ambiente sin comprometer el desarrollo económico y social de la entidad.

2.2. Alcance y delimitación de la investigación

El alcance espacial de la presente investigación corresponde a la superficie comprendida por la subcuenca del río Zahuapan, mientras que su alcance temporal es dado por el análisis histórico de sus características, su condición actual y la construcción de escenarios que consideren la alteración de las variables climáticas bajo determinadas proyecciones de concentraciones de gases de efecto invernadero hacia los años 2039 y 2075.

2.3. Hipótesis

Considerando la dominancia actual de un clima continental templado en la región, el impacto potencial del fenómeno de cambio climático en la subcuenca se reflejará en un incremento de las necesidades hídricas de la vegetación, debido a una mayor evapotranspiración como consecuencia del incremento de la temperatura del aire, mientras que el régimen de precipitaciones se verá modificado en su distribución temporal y espacial, lo cual, en su conjunto, podrán conducir hacia condiciones de mayor aridez en la subcuenca.

2.4. Objetivo general

- Establecer la línea base Hídrico-Climática de la subcuenca del río Zahuapan, y modelar escenarios climáticos hacia los horizontes cercanos y lejanos, para identificar las tendencias, retos y acciones a tomar en el manejo integral del territorio.

2.5. Objetivos particulares

- Realizar un análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en la subcuenca para identificar las principales tendencias de modificación del paisaje y la alteración de ecosistemas primarios.
- Elaborar la caracterización hidroclimática actual de la subcuenca para su establecimiento como línea base en análisis posteriores.
- Establecer escenarios de cambio climático de la zona de estudio bajo distintos modelos de circulación general de la atmósfera y concentraciones de gases de efecto invernadero hacia horizontes cercano y lejano para su comparativa con la línea base.
- Estimar proyecciones de la dinámica hidrológica en la subcuenca alimentadas con los resultados de los escenarios de cambio climático esperados en el horizonte cercano y lejano, para el análisis de la respuesta en las variables hidrológicas con respecto a la línea base.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Cuenca hidrográfica

De manera general una cuenca es considerada una depresión en la superficie de la tierra, un valle rodeado de alturas, sin embargo, el término cuenca hidrográfica tiene un sentido más

amplio. Se trata de una parte de la superficie terrestre cuyas aguas fluyen por un único sistema de drenaje natural hacia un mismo río, lago, presa, estuario, pantano, mar u océano, y a su vez es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas (FAO, 2007).

En la concepción moderna del manejo de políticas territoriales, la cuenca hidrográfica es considerada, cada vez más, como la unidad natural para el uso racional de los recursos naturales en general y de los recursos hídricos en particular (Cotler-Ávalos *et al.*, 2013). La planeación y uso del territorio de manera idónea debería considerar a las cuencas hidrográficas, siendo las unidades de división funcionales con mayor potencial para entender las relaciones entre población y entorno natural (Burgos y Bocco, 2015). Es así que las acciones y actividades del manejo de cuencas deben de conformar estrategias preventivas, algunas enfocadas a mantener practicas actuales de uso de suelo sostenibles, y otras más comunes empleadas en estrategias de restauración diseñadas para atender problemas ya identificados o para restaurar los ecosistemas a un nivel deseado (Brooks *et al.*, 1991).

La valoración de los elementos que integran una cuenca hidrográfica y el reconocimiento de su importancia como proveedora de bienes y servicios, sobre todo de agua, se ha desarrollado a lo largo de la historia, pues reflexionan Gaspari *et al.* (2013) un proverbio chino del Siglo V el cual menciona “quien domina la montaña domina los ríos”, lo que muestra un claro entendimiento de la dependencia de las zonas aguas abajo a las condiciones y características de las partes altas del territorio. Hacia finales del siglo XIX, al encontrarse las cadenas montañosas de Europa seriamente deforestadas y con la presencia de desprendimientos de aludes, en los países afectados se concibió el llevar a cabo lo que se denominó “restauración de montañas”, lo cual dio lugar a los actuales “proyectos de restauración hidrológico-forestal” (Mintegui-Aguirre y Robredo-Sánchez, 1994).

Retomando la idea del funcionamiento de una cuenca como un colector que recibe la precipitación y la transforma en escurrimientos, estos dependen tanto de las condiciones climáticas de la región como de las características físicas de la cuenca. Desde este punto de vista su funcionamiento está dado por su morfología, tipos de suelos, así como cobertura vegetal y uso de la tierra. La influencia de estos factores en la producción de escurrimientos es fácilmente predecible cualitativamente, no obstante, el expresar estas influencias mediante parámetros es más

difícil, por lo que se emplean cierto número de índices, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y estudios de semejanza (López y Mintegui, 1998).

De acuerdo con Gaspari *et al.* (2012) las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica facilitan su descripción física espacial y permiten realizar conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio, al considerar la geometría de las formas superficiales. De igual manera, la morfometría particular de cada cuenca está relacionada con su respuesta a los eventos climáticos, la producción de escorrentía superficial, la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran, así como la posibilidad de aprovechamiento hídrico.

En un mayor grado de detalle para el estudio y manejo de cuencas hidrográficas se hallan las unidades de respuesta hidrológica (HRU), las cuales Cabrera (2017) describe como áreas homogéneas de una cuenca basándose en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas. Esta “homogeneidad” no es sinónimo de subcuenca; por el contrario, una HRU está conformada usualmente por áreas dispersas y desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), elevación (aquel donde el volumen de precipitación varía con la altura), aspecto (especialmente en cuencas con glaciares), tipo de suelo, cubierta vegetal, usos de suelo, entre otros.

Según el análisis realizado por Cotler y Pineda (2008), el cual sintetiza los trabajos de Mollard y Vargas (2005), la cuenca hidrográfica como unidad de gestión de los recursos naturales en México se remonta a varias décadas atrás. Con una primera fase a inicios del siglo XX caracterizada por una administración centralizada del agua a través de delegaciones o instancias regionales, cuyo principal interés fue la necesidad de controlar las crecidas y de aumentar el área agrícola irrigada. Para ello, el gobierno se encargó de realizar las medidas hidrológicas, las obras de ingeniería y administrar los distritos de riego generados. La segunda fase, en la década de los 40, se basó en crear organizaciones de grandes cuencas para establecer políticas de desarrollo, siguiendo el ejemplo del valle de Tennessee en Estados Unidos, al basarse en el enfoque de gestión integral de recursos hídricos. Posteriormente, durante el sexenio 2001-2006, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) que para adoptar un manejo adecuado de los recursos naturales era necesario un enfoque integral de cuencas, para lo cual se requería organizar

a nivel federal el sector medioambiental mediante una estructura administrativa por cuencas hidrográficas. Simultáneamente, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dividió al país en 13 regiones hidrológicas donde actuarían 25 consejos de cuenca, los cuales se pretendía funcionaran como espacios de discusión y concertación para la toma de decisiones a nivel regional sobre la administración de los recursos hídricos.

3.2. Fenómeno de cambio climático

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018) define al cambio climático como todo cambio significativo en el sistema climático del planeta, que permanece por décadas o más tiempo, el cual puede darse por causas naturales, o como resultado de actividades humanas, en el cual el calentamiento global es la manifestación más evidente, y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas a nivel global.

Las observaciones de los últimos 42 años muestran que la temperatura media anual en el periodo 1991-2012, se ha elevado 0.9 °C en promedio en comparación con el periodo 1971-1990 en el territorio tlaxcalteca. La media histórica del período (1971-2012) se ubica en 14.1 °C y muestra que las observaciones están por arriba de la media histórica después de 1991, marcando una tendencia hacia un incremento acelerado en los últimos años (Universidad Autónoma de Tlaxcala, 2014). Sumado a lo anterior, el periodo de lluvias en la zona ha visto cambios considerables en cuanto a su temporalidad e intensidad. En la mayor parte de Tlaxcala la distribución mensual de la precipitación acentúa la desigualdad en la disponibilidad del recurso, ya que hasta el 75 % de la precipitación anual se presenta entre mayo y septiembre, siendo el resto del año relativamente seco (INEGI, 2017).

El cambio climático pone en riesgo la disponibilidad de agua al modificar los patrones de precipitación, humedad del suelo y producción de escorrentía, lo cual debe de sumarse a la presión que se generará sobre el recurso ante el incremento poblacional. Se considera que un aumento en la temperatura significará un incremento en la demanda de agua por parte de ecosistemas, cultivos y comunidades, lo cual conducirá a un mayor número de personas en situaciones de estrés hídrico (Barcena *et al.*, 2020).

El incremento de la temperatura promedio mundial se estima a partir de experimentos realizados con Modelos Climáticos Globales, también llamados en algunas fuentes como Modelos

de Circulación General de la Atmósfera (MCG). Un MCG es una representación matemática del sistema climático que simula los procesos físicos de la atmósfera, lo cual, permite evaluar los efectos en el clima global de diversas concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Aunque todos los MCG consideran un aumento de la temperatura global como consecuencia del incremento en la concentración de GEI, la forma en que cada MCG se aproxima los procesos físicos de la atmósfera es diferente, por lo que las proyecciones del clima futuro difieren de un modelo a otro (IPCC, 2007).

Los resultados de los MCG, en varias resoluciones espaciales, pueden utilizarse como entradas para simulaciones de modelos hidrológicos para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Sin embargo, los valores de salida de los MGC siguen siendo relativamente robustos en cuanto a resolución espacial y generalmente se consideran insuficientes para representar la variabilidad local, que es necesaria para los estudios de impacto del cambio climático en una región específica.

3.2.1. Escenarios de cambio climático

Ante los retos del cambio climático, una de las principales estrategias para enfrentar y reducir sus efectos negativos es emprender procesos de adaptación ante los impactos observados y proyectados. Debe entenderse que, en función de las vulnerabilidades actuales y futuras de la población, sectores o regiones de interés, la magnitud de las consecuencias puede diferir. De esta manera, para contextualizar y priorizar dichas vulnerabilidades se requiere del estudio de los factores que la determinan (Conde *et al.*, 2016). Por lo anterior, la construcción de escenarios de cambio climático representa una herramienta imprescindible para el diseño de planes de acción ante dicha problemática ambiental.

Los escenarios de cambio climático son construidos para ser empleados en la investigación de las consecuencias de dicho fenómeno, son una representación plausible del clima futuro generado a partir de modelos climáticos que simulan las principales variables climatológicas, siendo ampliamente calibrados contra observaciones históricas (INECC, 2017 e IPCC, 2014). Se basan en el desempeño regional de los MCG, cuyo desempeño debe evaluarse ya que un MCG puede representar bien una región, pero adaptarse de manera deficiente en otra, por lo que debe

entenderse que dichos escenarios no son pronósticos climáticos, ya que cada uno es una alternativa de cómo puede ser el clima futuro.

En 2013, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) publicó el quinto informe de evaluación que se basó en la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5), que incorpora las últimas versiones de los modelos climáticos y proporciona un nuevo conjunto de escenarios. Estos escenarios abarcan una gama de escenarios de fuerza radiativa plausibles llamados Trayectorias de Concentración Representativas, RCP por sus siglas en inglés (*Representative Concentration Pathways*).

Los RCP se denominan vías, o trayectorias, para enfatizar que su propósito principal es proporcionar proyecciones dependientes del tiempo de las concentraciones de gases de efecto invernadero atmosféricos hacia el año 2100 en comparación con los valores preindustriales del forzamiento radiativo. Los RCP representan el rango de emisiones de GEI, los cuales incluyen un escenario de mitigación estricto, RCP2.6, con un pico de forzamiento en el año 2039 aproximadamente en 3 W/m^2 y una reducción a 2.6 W/m^2 al llegar al año 2100. Dos escenarios de emisiones intermedios, RCP4.5 y RCP6.0, que prevén una estabilización del forzamiento radiativo en 4.5 y 6 W/m^2 , respectivamente. Y el escenario con más altas emisiones RCP8.5 que considera un incremento a 8.5 W/m^2 hacia el final de siglo.

3.2.2. Impacto del cambio climático en los recursos hídricos

Durante las últimas décadas el estudio de los impactos del fenómeno de cambio climático sobre la dinámica de los ecosistemas y del ciclo del agua ha adquirido mayor relevancia como herramienta de divulgación del riesgo de estrés hídrico sobre las poblaciones. A través de dichos acercamientos se identifican posibles rutas de acción que puedan mitigar los efectos del fenómeno y faciliten los cambios necesarios encaminados a la adaptación de actividades productivas. La cuantificación del impacto del cambio climático en la producción de escurrimientos es una tarea esencial para la gestión de los recursos hídricos a largo plazo, siendo la aproximación metodológica, así como el alcance espacial y temporal sumamente diferentes en función de los objetivos de cada investigación.

Una de las principales dificultades al realizar estudios predictivos es la creación de escenarios de cambio climático para una región en particular a partir de la escala a la que se

encuentran los MCG, los cuales de manera general poseen una resolución espacial de entre 150 y 250 km. La realización de re-escalamientos a un nivel adecuado que refleje las condiciones climáticas específicas del área de estudio es necesaria, dichos procesos pueden partir de la revisión y conocimiento de expertos que permitan incorporar criterios de la topografía local, así como de la dinámica de las corrientes de aire regionales entre otros factores. Por otra parte, dicha labor puede realizarse mediante procesos automatizados como lo realizado por Wang *et al.* (2020) quienes para la cuenca del río Wabash, Estados Unidos, evaluaron un proceso de Redes Neuronales Artificiales (ANN por sus siglas en inglés) basado en una técnica estadística (*Statistical Downscaling Model*) para la reducción de escala de las variables precipitación así como temperaturas máxima y mínima, la cual reprodujo de manera exitosa los resultados observados permitiendo obtener una rejilla de $0.385^\circ \times 0.385^\circ$ (40 km aproximadamente).

Adicional al reto que supone el re-escalamiento de la información de los modelos de circulación general, es igual de importante la existencia de información climatológica suficiente que permita caracterizar la zona de estudio y cuya resolución espacial y temporal permitan implementar de manera adecuada las anomalías que son reportadas por los MCG. En trabajos como el de Allam *et al.* (2019) se observa la atención a este tema pues en su investigación, la cual forma parte del Programa *Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment* (HyMeX) el cual busca realizar una mejor comprensión de la hidrología de la región del mediterráneo, se emplearon datos climáticos de tres fuentes: 1) Proyecto WorldClim, el cual es una base de datos del clima global en una alta resolución espacial (de hasta 1 km); 2) Bases de datos de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, E.U.) de 144 estaciones en 20 países del mediterráneo con un periodo de registros de 30 a 120 años; y, 3) registros históricos para el *Coordinated Regional Downscaling Experiment specific for the Mediterranean* (MED-CORDEX) con resolución de 12 km.

El empleo de las proyecciones futuras de las variables hidrológicas por el MED-CORDEX hacia el periodo 2070-2100 les permitió a Allam *et al.* (2019) identificar que, con respecto al periodo de referencia, 1970-2000, la temperatura aumentará entre 1.4 y 3.5 °C con una reducción del 10% en la precipitación para un tercio del área evaluada (el estudio abarcó 3681 cuencas que cubren un total de 1,781,645 km² del mediterráneo), aunque con un incremento en el resto bajo el escenario RCP4.5. De manera general la región se volverá moderadamente árida, acentuándose

los cambios con el escenario RCP8.5, oscilando el incremento en la temperatura entre 2.5 y 6.5 °C, con una reducción del 20 % en la precipitación para la mitad de la región mientras que el resto manifestaría incrementos de hasta el 25 %.

Las consecuencias del cambio climático pueden ser muy diversas inclusive dentro de una misma región, por lo cual información climatológica histórica de calidad y a una adecuada resolución espacial es de suma importancia para poder construir escenarios que puedan considerarse plausibles de presentarse considerando las características propias de la zona de interés. Y de esta manera atender objetivos específicos, como el establecer una clasificación del territorio basada en índices climáticos, útil en el seguimiento hidrológico, de eco-hidrología y la vinculación con actividades productivas.

Estudios para superficies de gran tamaño son comunes, ejemplo de ello es lo realizado para identificar la sensibilidad de los escurrimientos al cambio climático en la cuenca del río Nilo desarrollado por Hasan *et al.* (2018). Cuenca donde una reducida disponibilidad, baja calidad y limitado acceso a datos suelen complicar la estimación de la sensibilidad de la escorrentía por métodos convencionales. La investigación propuso integrar los conceptos de índice de aridez (IA) y la elasticidad climática para obtener una respuesta de primer orden utilizando pocos datos de entrada, la esencia del método y del concepto de elasticidad de la escorrentía tiene sus bases en la consideración de la energía disponible para evapotranspiración y su efecto al determinar si la precipitación recibida es susceptible a volverse escurrimiento. La información climatológica para el periodo de referencia 1960-2015 fue obtenida del *Global Precipitation Climate Center* y de la Unidad de Investigación Climática (CRU) de la Universidad del Este de Anglia, mientras que las modificaciones a la precipitación y temperatura esperadas para el año 2050 partieron de la media del conjunto de 17 MCG exclusivamente para el escenario RCP8.5. De manera general los MCG coinciden en que en la cuenca del río Nilo existirá un incremento de la temperatura de entre 2 y 4 °C, aunque presentan distintos comportamientos en cuanto a la tendencia y magnitud del cambio en la precipitación, lo cual en interacción con el incremento de temperatura produce un abanico de respuestas en la escorrentía al verse de manera directa condicionados al potencial de evapotranspiración.

Los resultados del proceso de re-escalamiento de las coberturas de las variables climatológicas les permitieron a Wang *et al.* (2020) alimentar un modelo hidrológico en la

herramienta SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) para cuantificar la respuesta de los escurrimientos en la cuenca del río Wabash ante el cambio climático hacia el periodo 2021-2050 y 2070-2099. Al emplear 5 MCG (GFDL-ESM2G, CanESM2, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM y NorESM1-M) para los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, los autores pudieron identificar las principales tendencias en el comportamiento de los escurrimientos concluyendo que en general se proyecta una esorrentía anual y cambios mensuales decrecientes muy similares entre los escenarios RCP2.6 y RCP4.5. Mientras que la respuesta en el RCP8.5 aparenta tener afectaciones ligeramente menores e inclusive hacia mediados de siglo indican un incremento en las precipitaciones en las estaciones de invierno y primavera, lo cual evidencia el no realizar generalizaciones en cuanto a la respuesta de las variables climáticas para todas las regiones.

Las modificaciones en la distribución espacial y temporal de las lluvias afectan de manera directa la disponibilidad de humedad para un determinado sitio, el impacto de las alteraciones del régimen hídrico puede manifestar sus efectos en distintas escalas temporales, y si bien la literatura define cuatro tipos diferentes de sequías: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica, muchos trabajos de investigación que involucran escenarios de cambio climático se concentran en el análisis de sequías meteorológica e hidrológica. Siendo la primera caracterizada por un déficit de precipitación y que está vinculada a otros tipos de sequías, mientras que la segunda es definida como aquella que ocurren cuando un déficit de precipitación se propaga al nivel de agua superficial o subsuperficial resultando en dificultades para soportar el uso normal de agua.

Zhao *et al.* (2019) centraron su atención en 5,797 cuencas de América del Norte para identificar el cambio de frecuencia en las sequías meteorológicas e hidrológicas extremas de verano utilizando los modelos climatológicos de conjunto grande *Canadian Earth System Model* (CanESM2) y *Community Earth System Model* (CESM1) bajo escenarios RCP8.5. Si bien los mismos autores concluyen que el empleo de solo dos modelos climatológicos es insuficiente para definir resultados fiables para una zona de estudio tan amplia, más aún el limitarse al escenario RCP con mayores emisiones de gases de efecto invernadero, el trabajo corresponde a un adecuado acercamiento al entendimiento de cuáles podrían ser las condiciones plausibles de presentarse en determinada región. Ambos modelos arrojan que el comportamiento general para las sequías meteorológicas se agravará al presentarse cambios de frecuencia más significativos para las sequías

con periodo de retorno de 100 años que aquellas de 20 y dos años. De igual manera ambos modelos mostraron que para la mayor parte de Canadá, el medio oeste de Estados Unidos y sobre el suroeste a través del Golfo de México empeorarán las sequías hidrológicas de verano, incrementado en su frecuencia, inclusive en aquellas cuencas en las que la precipitación de verano se vio incrementada, lo cual se prevé tenga un impacto negativo en los sistemas de gestión de agua en toda la región.

Los objetivos de las diversas investigaciones que pretenden identificar impactos a futuro sobre los recursos hídricos pueden estar motivados por la preocupación de consecuencias negativas sobre la producción agrícola o la problemática social y administrativa que pueda derivarse de la gestión de las aguas superficiales. La simulación de modelos hidrológicos de alta resolución temporal, como lo son los desarrollados por la herramienta SWAT, permiten analizar a mayor detalle el comportamiento de los eventos de precipitación y escorrentía en el tiempo con lo cual pueden evaluarse periodos de sequías, pero también eventos de inundaciones. Lo cual ante un mayor crecimiento de los asentamientos urbanos en zonas de riesgo alrededor del mundo genera el incentivo por identificar el grado de vulnerabilidad al que está sujeto la población.

Huang *et al.* (2020) evaluaron los impactos del cambio climático en flujos de corrientes extremas en la cuenca del río Kaidu en el noroeste de China, realizando el modelado hidrológico mediante la herramienta SWAT con periodo de registro de información 1961-2011, bajo los 4 escenarios RCP del AR5 del IPCC para 32 MCG provenientes de la Fase 5 del *Coupled Model Inter-comparison Project* (CMIP5). El análisis de los registros históricos indica que tanto la temperatura como la precipitación se han visto incrementadas sobre todo desde la década de 1990 y que los escurrimientos en la zona son atribuibles en mayor grado al proceso de deshielo en la parte alta de la cuenca más que a la precipitación. Los resultados indican que la precipitación media anual incrementará de manera general sobre todo por los incrementos a presentarse en la precipitación invernal, y que las alteraciones en los acumulados mensuales sean positivas de hasta 19.2 % (RCP2.6), 26.1 % (RCP4.5), 19.0 % (RCP6.0) y 35 % (RCP8.5). Sin embargo, los incrementos generalizados en la temperatura inducirán valores de evapotranspiración total que propiciarán una disminución considerable en los flujos de cauces con lo que se concluye que es de esperarse una disminución de los riesgos por escurrimientos extremos e inundaciones, sin embargo, surge la amenaza de sequías para la región.

En el trabajo de Myo *et al.* (2020), los autores evaluaron la producción de escurrimientos en la cuenca del río Bago en el Delta del Ayeyarwady, Myanmar, mediante el *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System Model* (HEC-HMS) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. Comparando los resultados de los valores registrados para el periodo de referencia 1981-2005 con lo obtenido para los intervalos 2020-2046, 2047-2073 y 2074-2100 bajos los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. De manera general se observa que para los diez MCG evaluados existirá un incremento en la precipitación media anual hacia los tres horizontes temporales considerados bajo ambos escenarios RCP, pero con un comportamiento a reducirse en los meses previos y posteriores a la temporada de monzón.

Los modelos hidrológicos de simulación de escurrimientos comparten la característica de reportar volúmenes y gasto de los escurrimientos superficiales a presentarse en el punto único de drenaje de la cuenca hidrográfica, también definido como boquilla, la cual debe poseer suficientes registros hidrométricos para poder realizar las comparativas necesarias entre valores medidos y simulados durante las etapas de construcción, calibración y validación del modelo. Es así que los procesos de validación se realizan mediante la obtención de indicadores, aquellos encontrados en la revisión de literatura realizada son principalmente: el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el criterio de Schultz (D), la desviación media acumulada (MAD) y el error de balance de masas.

La familia de escenarios SRES (*Special Reports on Emission Scenarios*), publicados originalmente en el año 2000 y que fueron empleados en el Tercer Informe de Evaluación (TAR) de 2001 y en el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) de 2007 del IPCC, fueron los recursos empleados para estudios de cambio climático, por lo que muchas investigaciones encontradas en la literatura listan a los cuatro escenarios (A1, A2, B1, B2). Estos se diferencian de los escenarios RCP al estar fundamentados en las fuerzas motivadoras del cambio climático como lo es la población y el crecimiento socio-económico y sus impactos en la implementación de acciones de mitigación del fenómeno, y no sobre un factor físico definido como lo son las trayectorias de concentración de los escenarios RCP.

En el trabajo de Velázquez *et al.* (2017) se usó el escenario A2, el cual puede considerarse un aproximado del nivel de concentración de CO₂ equivalente al del escenario RCP8.5. Para suplir al modelo hidrológico, desarrollado en SWAT para la cuenca del río Tampaón en San Luis Potosí,

México, se utilizó información climatológica de la base de datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el intervalo 1971-2000, calibrando el modelo para el periodo 1971-1985 y validado para el periodo 1986-2015. Debe observarse que al igual que en otros trabajos, la colección de información hidrométrica debe ser lo suficientemente amplia para poder comparar los valores medidos contra los simulados en el proceso de calibración y validación de modelos hidrológicos de este tipo. Los resultados obtenidos indican una variabilidad dentro de cada MCG bajo análisis, pues el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas en el periodo de primavera comparten un incremento de hasta 3.8 y 2.7 °C, respectivamente. Mientras que la precipitación observa cambios tanto positivos como negativos que se manifiestan en las simulaciones hidrológicas donde 4 de los 5 MCG muestran un comportamiento similar y el restante proyecta un cambio negativo. Lo cual resalta nuevamente la variabilidad de resultados que pueden producir distintos MCG, y por lo cual es de importancia no considerar solo uno de ellos como una predicción absoluta del clima a esperarse en una zona.

La evaluación del impacto de escenarios de cambio climático sobre los recursos hídricos no se limita al empleo de modelos de simulación de flujos en cauces tan especializados como los empleados en los casos antes descritos. Gerbaux *et al.* (2009) emplearon modelos “simplificados” para estudiar la respuesta de la escorrentía en la región del Sahel, una zona ecoclimática y biogeográfica de transición entre el desierto del Sáhara al norte y la sabana sudanesa al sur. Calcularon la escorrentía a partir de un modelo de lluvia simulada evaluado en el presente y bajo un escenario de cambio climático basado en el MCG Arpège. Los resultados obtenidos indicaron que la escorrentía profunda, así como el número de eventos de escorrentía se incrementarán debido a aumentos en la frecuencia de eventos de precipitación más que en la intensidad de los mismos.

Estudios similares se han realizado en el país, Álvarez *et al.* (2020) emplearon el método precipitación-escurrimiento de la NOM-011-CONAGUA-2015, descrito como método indirecto para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural (VMAEN), y en el cual evaluaron los impactos a esperarse en el balance hídrico bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 hacia el año 2050 con respecto al estado actual en el Área Natural Protegida La Primavera, Jalisco. Los resultados obtenidos indican una reducción de la precipitación promedio para la ANP y su zona de influencia de 904.3 mm anuales actualmente a 871 y 820 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente, lo cual impactará en los componentes del balance hidrológico.

Estimándose los valores de VMAEN en 28.4, 26.7 y 23.8 Mm³ año⁻¹ para el estado actual, RCP4.5 y 8.5 respectivamente, lo que representa una reducción del 4.6 y 10.1 %. El componente infiltración también se vio reducido en un 26 y 31%. Este caso es un ejemplo del empleo de métodos más sencillos de ejecutar pero que permiten realizar los primeros acercamientos al impacto potencial sobre los balances hidrológicos en zonas no estudiadas con anterioridad, a fin de identificar, aunque de manera generalizada, tendencias de cambio y magnitud de las mismas.

La disponibilidad hídrica en cuanto a cantidad y calidad será una de las principales problemáticas a presentarse para las poblaciones ante los panoramas de cambio climático global, por ello adquiere mayor relevancia el estudio de las alteraciones probables de presentarse en las variables climáticas. Ya que la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura, siendo esta última responsable de un incremento en la evapotranspiración el cual es un parámetro muy sensible de verse afectado por el cambio climático más que cualquier otro componente hidrológico, representan un impacto potencialmente significativo en los flujos de corrientes y con ello en la disponibilidad total del recurso para sus distintos usos.

La evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos se desarrolla por los múltiples componentes que comprende la cadena de simulación hidrológica (la elección de MCG, el escenario de emisiones empleado, el método de corrección de sesgo entre escalas y el modelo hidrológico implementado), por lo cual se debe prestar la misma atención a cada una de las etapas en cuestión a fin de garantizar resultados confiables y que representen la mejor estimación en cuanto a los escenarios por presentarse para una zona en específico.

Es posible también considerar que la variabilidad climática local bajo escenarios de cambio climático global no siempre obedece a los mismos comportamientos como regla general, sino que es dependiente del modelo específico de clima global desarrollado y de las características específicas de respuesta del área bajo estudio. Por lo cual es adecuado realizar comparativas entre la respuesta de distintos MCG a fin de identificar tendencias y un comportamiento general capaz de ser considerado probable de presentarse, pues a lo largo de la revisión de los estudios antes listados en esta sección es posible observar que las alteraciones de los regímenes hidrológicos suelen responder de maneras diversas.

El incremento de la temperatura global hacia el futuro está condicionado a las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera, con lo cual se modifica el balance energético de la misma, lo cual queda expresado en las distintas trayectorias RCP que se han planteado por el IPCC. Este fenómeno condiciona las características de la circulación general de la atmosfera y cuyo efecto es conocido como cambio climático, cuyas principales consecuencias son la alteración en la cantidad y distribución de la precipitación alrededor del mundo, y un aumento en la temperatura que incrementa la evapotranspiración potencial. La interacción de ambos procesos puede darse de múltiples formas dependiendo las nuevas magnitudes de ambas y de la proporción que guarden entre ellas, y finalmente, culminar en una reducción de los escurrimientos o un incremento de los mismos. Lo anterior de manera general se traduce en la alteración del balance hidrológico con respecto al estado actual y por consiguiente una probabilidad de los territorios a presentar inundaciones o sequías.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

La zona de investigación corresponde a la parte central del estado de Tlaxcala, específicamente al área de drenaje del río Zahuapan, siendo el más importante de la entidad con un amplio contexto económico-social en la región, además de ambiental, pues se encuentra entre los cuatro ríos más contaminados del país.

4.1.1. Ubicación geográfica

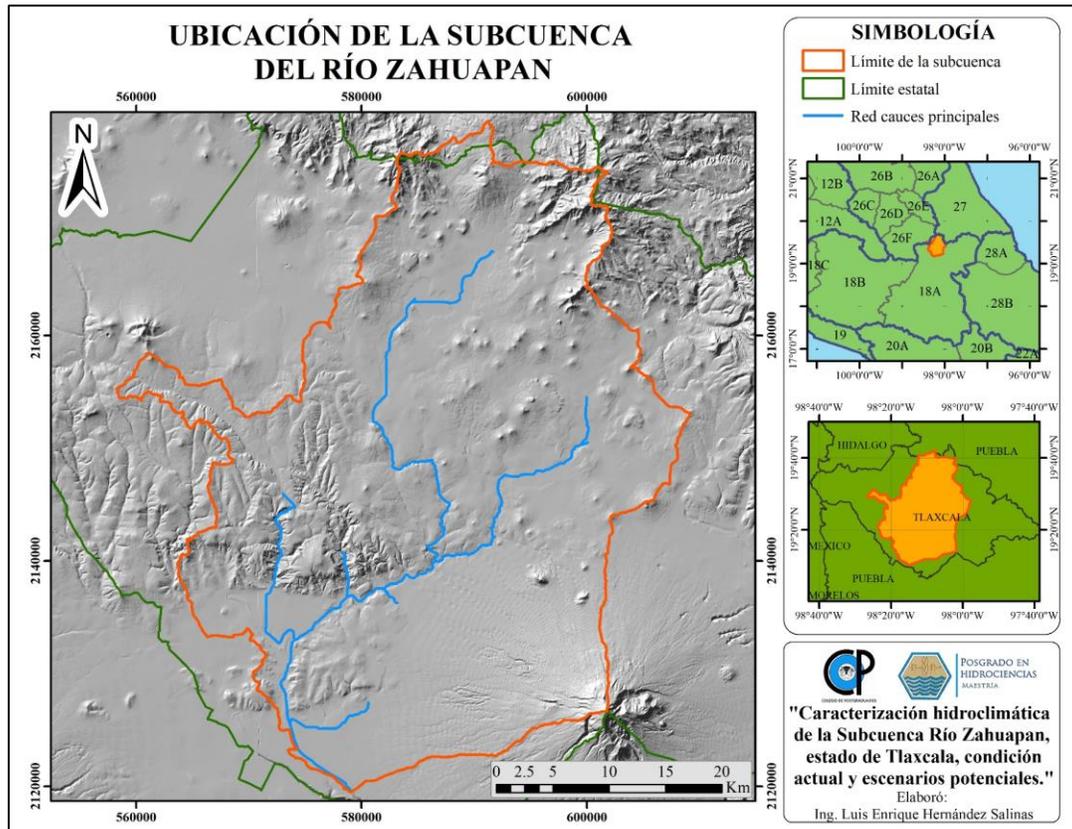


Figura 4.1.- Ubicación y aspecto de la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.

Después de realizar la delimitación de la subcuenca, proceso que se detallará en un posterior apartado, es posible mencionar que las coordenadas extremas que acotan la zona de estudio son: 19° 42' 20" N, 98° 26' 38" O y 19° 12' 01" N, 97° 57' 42" O. De manera más específica, se trata de una superficie que se encuentra dentro de las siguientes cartas topográficas con escala 1:50,000 elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): E14B22-APAN, E14B23-TLAXCO, E14B24-MEXCALTEPEC, E14B32-SAN MARTÍN TEXMELUCAN, E14B33-TLAXCALA DE XICOHTENCATL, E14B34-HUAMANTLA y E14B43-PUEBLA DE ZARAGOZA.

4.1.2. Localización política

La zona de estudio corresponde en su mayoría al territorio político del estado de Tlaxcala, aunque una pequeña porción al norte de la subcuenca se encuentra dentro del estado de Puebla, de manera específica la subcuenca propuesta incluye superficie parcial o total de 43 municipios del estado de Tlaxcala y 2 municipios de Puebla, lo cual se detalla en el Cuadro 4.1, el cual precisa la clave del municipio asignada dentro de cada entidad y que corresponde a la etiqueta mostrada en la Figura 4.2. El área drenada considerada en la propuesta incluye la mayor parte de los valles centrales del estado, y con ello se incluyen las principales urbes de la entidad: Tlaxco, Apizaco, Tlaxcala de Xicohtencatl, Santa Ana Chiautempan y Zacatelco.

Cuadro 4.1.- Municipios dentro del área de la subcuenca.

Clave municipio	Nombre Municipio	Entidad	Área (ha)	Clave municipio	Nombre Municipio	Entidad	Área (ha)
053	Chignahuapan	Puebla	895.6	054	San Lorenzo Axocomanitla	Tlaxcala	447.3
083	Ixtacamaxitlán	Puebla	37.1	055	San Lucas Tecopilco	Tlaxcala	2,842.1
022	Acuamanala de Miguel Hidalgo	Tlaxcala	1,491.7	025	San Pablo del Monte	Tlaxcala	423.8
001	Amaxac de Guerrero	Tlaxcala	1,110.5	020	Sanctórum de Lázaro Cárdenas	Tlaxcala	731.5
002	Apetatitlán de Antonio Carvajal	Tlaxcala	1,155.1	056	Santa Ana Nopalucan	Tlaxcala	631.0
005	Apizaco	Tlaxcala	4,339.4	057	Santa Apolonia Teacalco	Tlaxcala	649.8
003	Atlangatepec	Tlaxcala	10,600.3	058	Santa Catarina Ayometla	Tlaxcala	895.6
010	Chiautempan	Tlaxcala	7,679.9	059	Santa Cruz Quilehtla	Tlaxcala	540.8
018	Contla de Juan Cuamatzi	Tlaxcala	2,600.4	026	Santa Cruz Tlaxcala	Tlaxcala	2,574.3
009	Cuaxomulco	Tlaxcala	1,657.9	060	Santa Isabel Xiloxotla	Tlaxcala	601.2
012	Españita	Tlaxcala	965.9	028	Teolochohco	Tlaxcala	4,893.9
013	Huamantla	Tlaxcala	330.0	019	Tepetitla de Lardizábal	Tlaxcala	0.4
014	Hueyotlipan	Tlaxcala	7,699.5	029	Tepeyanco	Tlaxcala	1,629.6
015	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	Tlaxcala	7,305.8	030	Terrenate	Tlaxcala	1,905.3
048	La Magdalena Tlaltelulco	Tlaxcala	1,175.1	031	Tetla de la Solidaridad	Tlaxcala	16,829.4
047	Lázaro Cárdenas	Tlaxcala	5,51.6	032	Tetlatlahuca	Tlaxcala	2,275.3
017	Mazatecochco de José María Morelos	Tlaxcala	518.0	033	Tlaxcala	Tlaxcala	5,169.1
011	Muñoz de Domingo Arenas	Tlaxcala	,3130.8	034	Tlaxco	Tlaxcala	24,839.8
023	Nativitas	Tlaxcala	831.6	035	Tocatlán	Tlaxcala	729.4
024	Panotla	Tlaxcala	6,061.2	036	Totolac	Tlaxcala	1,373.4
041	Papalotla de Xicohténcatl	Tlaxcala	399.3	038	Tzompantepec	Tlaxcala	3,818.1
049	San Damián Texóloc	Tlaxcala	1,015.2	039	Xaloztoc	Tlaxcala	4,069.7
050	San Francisco Tetlanohcan	Tlaxcala	3,929.4	040	Xaltocan	Tlaxcala	10,221.4
051	San Jerónimo Zacualpan	Tlaxcala	774.4	042	Xicohtzingo	Tlaxcala	291.7

Clave municipio	Nombre Municipio	Entidad	Área (ha)	Clave municipio	Nombre Municipio	Entidad	Área (ha)
053	San José Teacalco	Tlaxcala	2,791.1	043	Yauhquemehcan	Tlaxcala	3,718.0
053	San Juan Huactzinco	Tlaxcala	453.4	044	Zacatelco	Tlaxcala	2,206.5

4.2. Caracterización de la subcuenca

La subcuenca de interés cubre gran parte del territorio tlaxcalteca, sin embargo, mediante el análisis espacial de su superficie se determinó que realmente posee una fracción de área dentro del territorio del estado de Puebla. La cual es de mínima extensión, pues de 164,662.31 ha que posee la subcuenca, solo 980.65 ha corresponden a dicha entidad, esta área que se encuentra al norte del territorio representa poco menos del 1% del total, tal condición puede observarse en la Figura 4.2.



Figura 4.2.- División Política de la subcuenca del río Zahuapan.

4.2.1. Fisiografía

Las principales formas topográficas a considerarse dentro del territorio son; sierra, lomerío, llanura y meseta, las cuales son característicos de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico a la cual pertenece el área de estudio, y de manera más específica a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac. La distribución de estas puede observarse en la Figura 4.3.

Sin embargo, para no perder información valiosa del detalle generado por INEGI (2001), se condensó la distribución espacial de la fisiografía dentro de la zona de interés en el Cuadro 4.2, donde se observan las características de las entidades. Podemos concluir que en la zona predominan las llanuras, las cuales corresponde a las planicies de la parte central del estado y que son resultado de procesos sedimentarios provenientes de las regiones accidentadas del norte, oeste y sobre todo del volcán La Malinche.

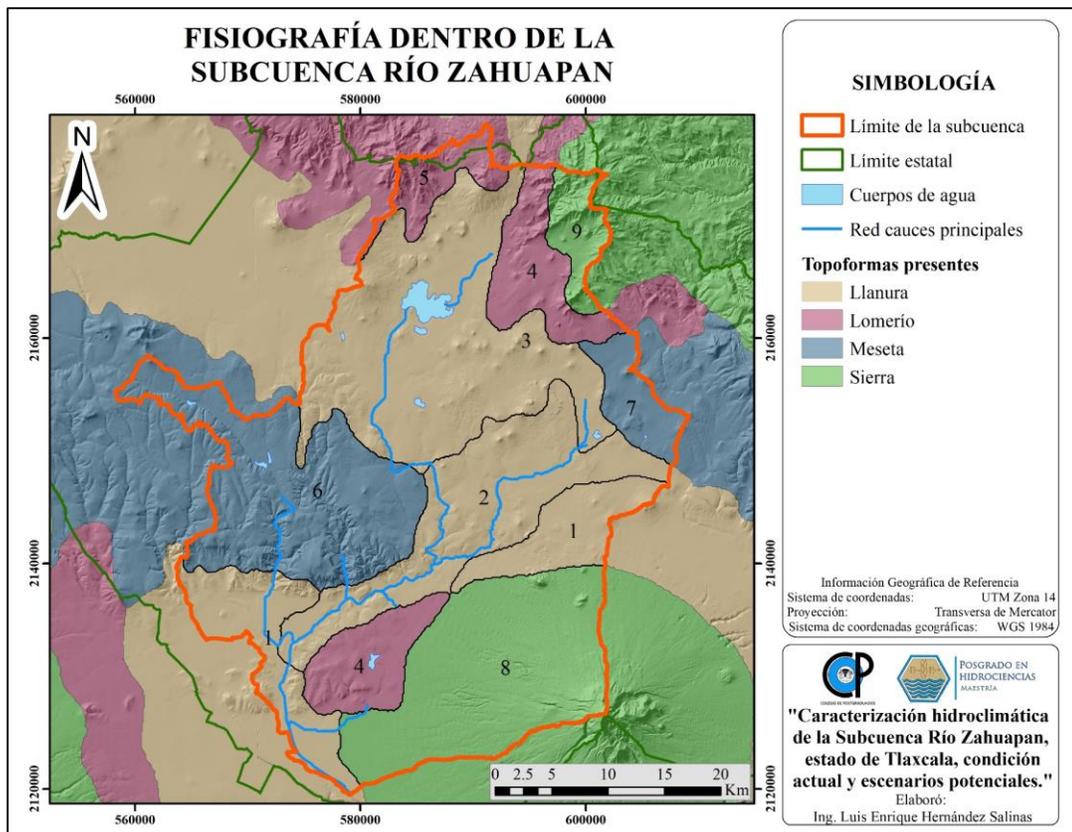


Figura 4.3.- Fisiografía de la subcuenca del río Zahuapan.

Cuadro 4.2.- Composición Fisiográfica de la subcuenca del río Zahuapan.

Entidad	Descripción	ID	Área (ha)	%
Llanura	Llanura con lomerío de piso rocoso o cementado	3	38,866.61	24%
Sierra	Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados	8	27,981.34	17%
Meseta	Meseta basáltica con cañadas	6	26,795.15	16%
Llanura	Llanura aluvial con lomerío de piso rocoso o cementado	2	22,434.69	14%
Llanura	Llanura aluvial con lomerío	1	18,208.14	11%
Lomerío	Lomerío de tobas	4	15,651.53	10%
Lomerío	Lomerío de tobas con llanuras	5	4,476.40	3%
Meseta	Meseta basáltica escalonada con lomerío	7	4,968.83	3%
Sierra	Sierra volcánica de laderas escarpadas	9	4,426.03	3%

4.2.2. Unidades climáticas

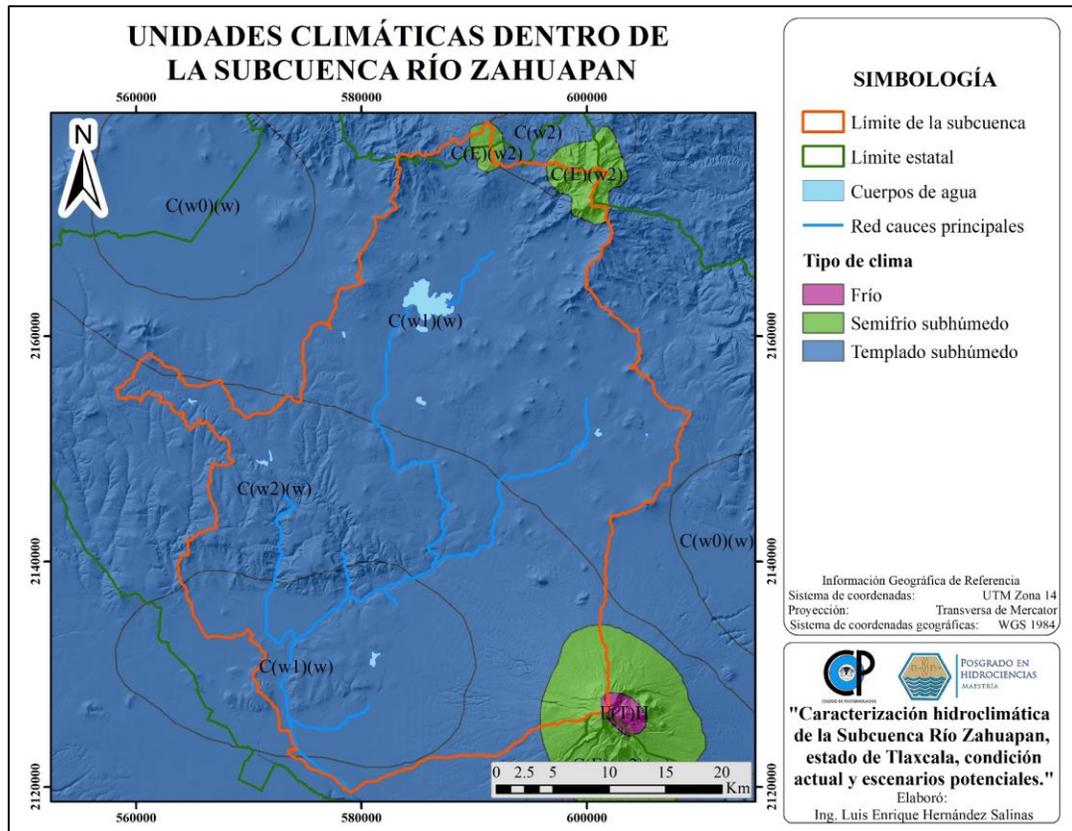


Figura 4.4.- Unidades Climáticas presentes en la subcuenca del río Zahuapan.

Dadas las características fisiográficas se observa una correlación de ésta con los tipos de clima que se distribuyen en la zona (Figura 4.4), mientras que la fórmula de acuerdo a la carta de

unidades climáticas elaborada por INEGI (2008) se presenta en el Cuadro 4.3, se observa que el clima templado subhúmedo domina en la zona de estudio.

Cuadro 4.3.- Climas presentes en la subcuenca del río Zahuapan.

Clave	Tipo	Superficie (ha)	%
C(w1)(w)	Templado subhúmedo	100,695.05	61.47%
C(w2)(w)	Templado subhúmedo	56,422.21	34.44%
C(E)(w2)(w)	Semifrío subhúmedo	3,748.56	2.29%
C(E)(w2)	Semifrío subhúmedo	2,224.49	1.36%
C(w2)	Templado subhúmedo	638.59	0.39%
E(T)H	Frío	79.81	0.05%

4.2.3. Edafología

Los resultados del análisis de la edafología se detallan en el Cuadro 4.4 y Figura 4.5. Considerando que las relaciones dadas por la ubicación geográfica, el clima regional, así como la fisiografía y geología de un sitio establecen los procesos de formación de suelos, se observa que la distribución de las unidades de suelo obedece a un patrón muy relacionado con las topoformas presentes en la zona.

Aun cuando la escala a la que se encuentra los datos de las fuentes de información representa un cierto grado de inexactitud, estos permiten generar una aproximación al comportamiento de la zona de estudio. En este primer mapa presentado se despliega la distribución de los grupos edafológicos dominantes en los polígonos generados por INEGI para el Continuo Nacional Edafológico - Escala 1.250,000, particularmente los recursos presentes en las Cartas E14-2 y E14-3.

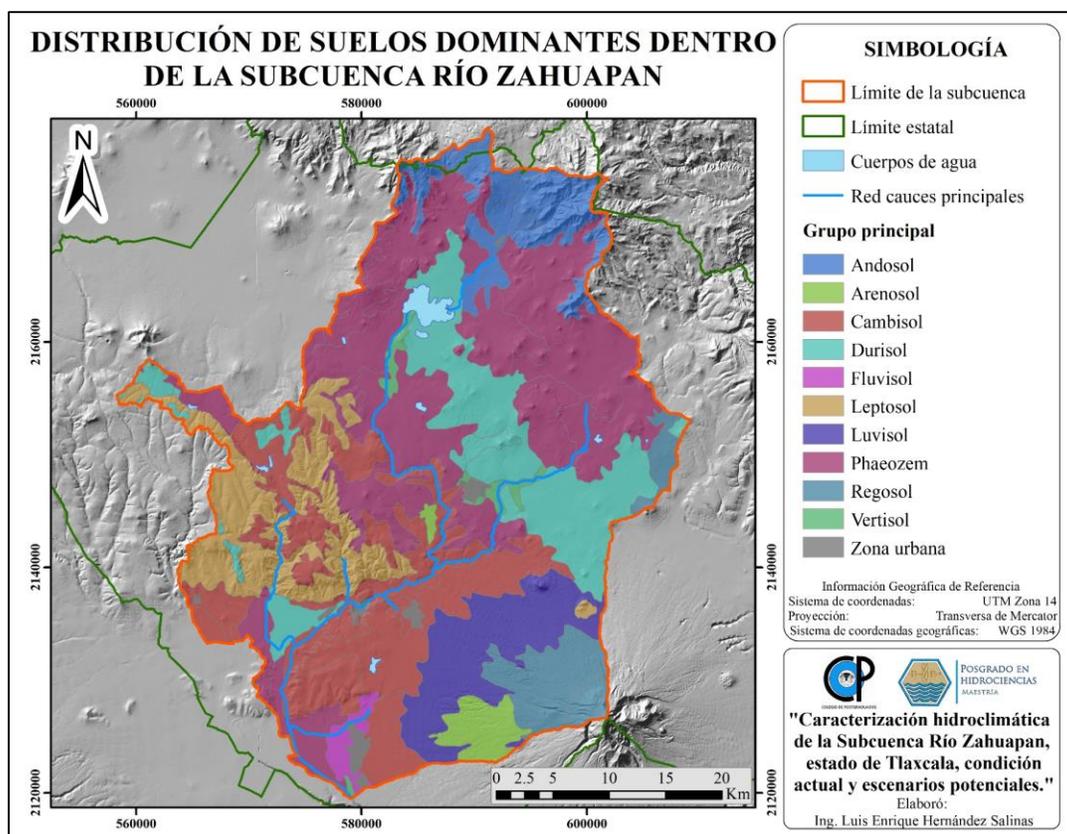


Figura 4.5.- Edafología de la subcuenca del río Zahuapan.

Cuadro 4.4.- Grupos Principales de Suelos presentes en la subcuenca del río Zahuapan.

Clave	Grupo principal	Superficie (ha)	%
PH	Pheozem	52,431.70	31.80%
CM	Cambisol	31,610.30	19.20%
DU	Durisol	22,823.60	13.90%
LP	Leptosol	16,205.60	9.80%
LV	Luvisol	12,252.50	7.40%
AN	Andosol	11,296.70	6.90%
RG	Regosol	8,519.30	5.20%
AR	Arenosol	3,470.40	2.10%
NA	Zona urbana + Cuerpos de agua	2,875.30	1.70%
VR	Vertisol	1,680.40	1.00%
FL	Fluvisol	1,496.60	0.90%

4.2.4. Descripción hidrológica

De manera general se describe el sentido de escurrimientos de la cuenca de norte a sur, iniciando en las serranías del norte de Tlaxcala, desde donde nace el río Zahuapan, y finalizando en los valles de inundación característicos del sur del estado. Finalmente, el cauce principal incorpora sus aguas a los escurrimientos provenientes de la Sierra Nevada integrándose al cauce del río Atoyac al adentrarse y continuar en el estado de Puebla.

El área de drenaje del río Zahuapan ha sido definida por INEGI como la subcuenca del río Zahuapan con clave RH18Ai, la cual es tributaria de la Cuenca río Atoyac (RH18A) y a su vez perteneciente a la Región Hidrológica 18 – Balsas, teniendo el río Balsas su desembocadura en la vertiente del océano Pacífico.

La dinámica hidrológica de la subcuenca es compleja debido a la fisiografía cambiante en el territorio, así como a los diversos tipos de materiales geológicos que han dado origen a la distribución actual de los suelos en la zona, lo cual tiene un impacto directo en la permeabilidad del suelo y en las coberturas vegetales que se han desarrollado en ella.

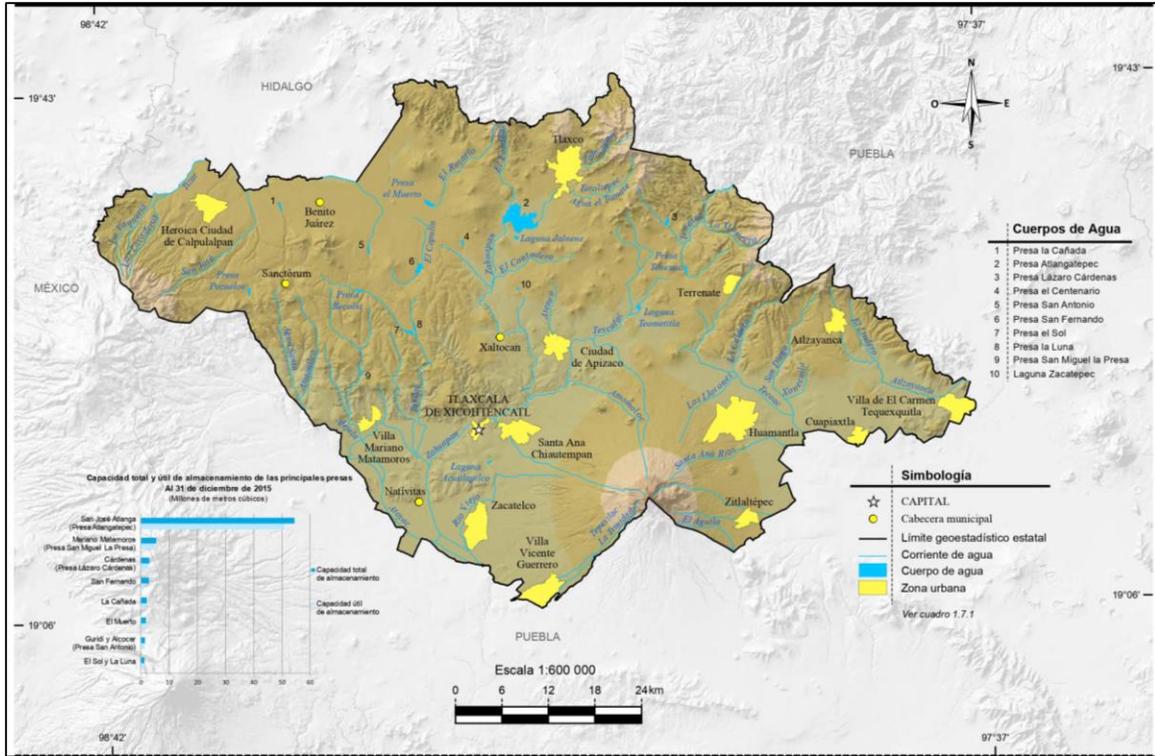


Figura 4.6.- Principales cauces y cuerpos de agua en el estado de Tlaxcala.

Fuente: INEGI, 2017

Debe prestarse atención al impacto de los cuerpos de agua naturales dentro del territorio y de las represas construidas en la retención de escurrimientos con el propósito de emplearlos en la agricultura, obras que impiden el libre tránsito de las escorrentías superficiales hacia la boquilla. Los principales cuerpos de agua dentro de la subcuenca son las lagunas de Jalnene, Zacatepec, Teometitla y Acuitlapilco, y las represas de Atlangatepec, El Centenario, Recoba, La Luna, y Las Cunetas.

En la Figura 4.7 pueden apreciarse las áreas de drenaje generadas mediante el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) para los cuerpos de agua presentes en el territorio, se observa que éstas son superficies de tamaño considerable. Sobre todo, la referente a la represa Atlangatepec al norte del estado, la cual fue diseñada con una capacidad máxima de 54.5 millones de metros cúbicos.

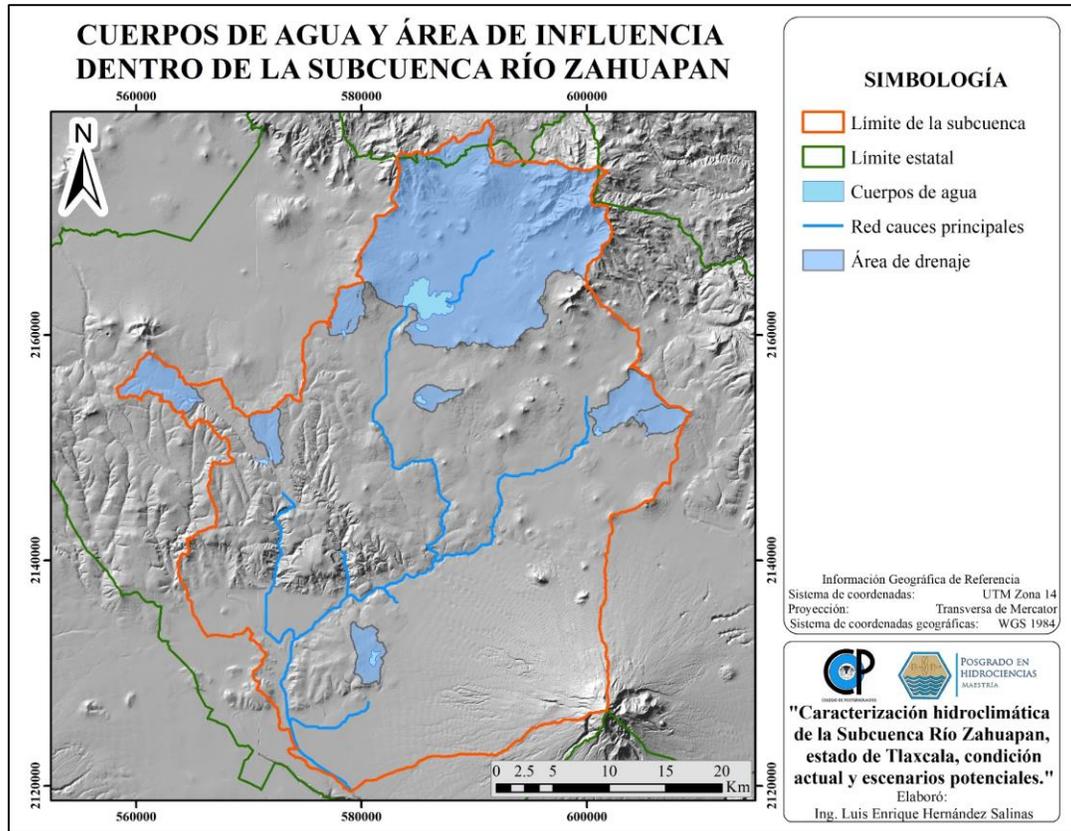


Figura 4.7.- Áreas de drenaje de los cuerpos de agua dentro de la subcuenca río Zahuapan.

4.2.5. Uso de suelo y vegetación

Cuadro 4.5.- Descripción del Uso de Suelo y Cobertura Vegetal de la subcuenca del río Zahuapan.

Clave Unión	Descripción	Área (ha)	%	%*
TA	Agricultura de temporal anual	90,453.08	55.22%	
TAP	Agricultura de temporal anual y permanente	17,155.04	10.47%	65.72%
TP	Agricultura de temporal permanente	51.85	0.03%	
PI	Pastizal inducido	1,3730.6	8.38%	8.38%
RA	Agricultura de riego anual	5,782.15	3.53%	
RAS	Agricultura de riego anual y semipermanente	7,437.63	4.54%	8.22%
RP	Agricultura de riego permanente	53.42	0.03%	
RS	Agricultura de riego semipermanente	187.26	0.11%	
VSa/BP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	2,368.05	1.45%	
VSA/BP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	551.67	0.34%	
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	2,391.44	1.46%	
VSa/BQP	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	1,049.46	0.64%	7.44%
VSa/BPQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	237.46	0.14%	
VSa/BJ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	5,583.97	3.41%	
VSh/BJ	Vegetación secundaria herbácea de bosque de táscate	4.76	0.00%	
BA	Bosque de oyamel	296.94	0.18%	
BC	Bosque cultivado	8.56	0.01%	
BP	Bosque de pino	6,019.4	3.67%	4.03%
BPQ	Bosque de pino-encino	283.59	0.17%	
BQ	Bosque de encino	2,568.63	1.57%	
BQP	Bosque de encino-pino	998.95	0.61%	2.18%
AH	Asentamientos humanos	1,438.78	0.88%	
ZU	Zona urbana	1,640.37	1.00%	1.88%
BJ	Bosque de táscate	2,047.88	1.25%	1.25%
H2O	Cuerpo de agua	1,220.64	0.75%	0.75%
VW	Pradera de alta montaña	172.15	0.11%	0.11%
VT	Tular	59.61	0.04%	0.04%
DV	Sin vegetación aparente	15.39	0.01%	0.01%

* Clases agrupadas: Agricultura de temporal, pastizal inducido, agricultura de riego,

vegetación secundaria/perturbada, bosque de coníferas, bosque de encino, asentamientos humanos, bosque de táscate, cuerpo de agua, pradera de alta montaña, tular, sin vegetación aparente.

El Cuadro 4.5 detalla cada tipo de vegetación presente de acuerdo a la Serie VI de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI con escala 1:250,000, así como los usos de suelo, por su parte la Figura 4.8 presenta su distribución en grupos generalizados. Se observa que el paisaje ha sido ampliamente modificado por la actividad humana, al ser el uso agrícola dominante en el área de estudio. Algo lógico de considerarse tomando en cuenta la importante presencia humana en la zona desde la época prehispánica, también se observa que las principales zonas con vegetación superior se encuentran en las sierras y lomeríos, sobre todo en las laderas del volcán La Malinche al sureste de la subcuenca, la cual corresponde a las vegetaciones propias del clima templado del centro del país.

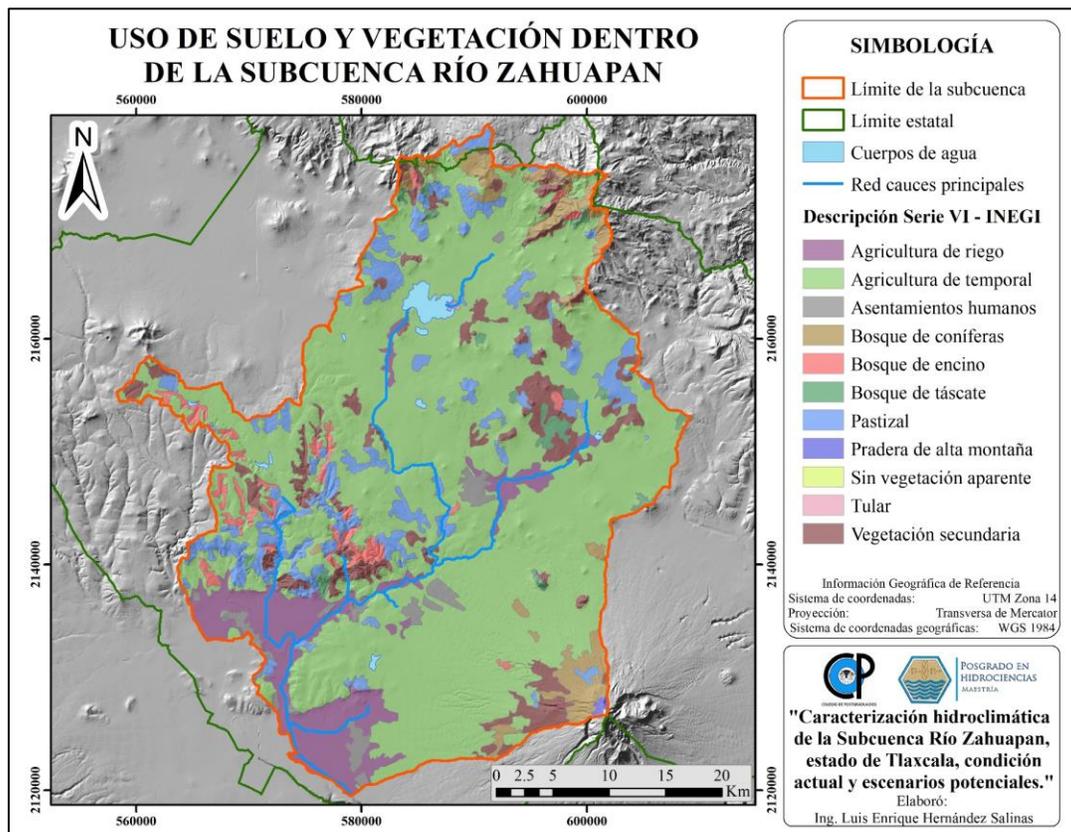


Figura 4.8.- Uso de Suelo y Vegetación en la subcuenca del río Zahuapan.

4.2.6. Áreas naturales protegidas en la zona de estudio

Existen dos tipos de Áreas Naturales Protegidas (ANP), federal y estatal, estas zonas representan esfuerzos de conservación de ecosistemas representativos para el estado, además de reservorios de recursos naturales destinados a un aprovechamiento sustentable. El Cuadro 4.6 proporciona algunos datos acerca de los polígonos correspondientes a la declaratoria estatal mientras que el Cuadro 4.7 corresponde a los de carácter federal, ambas condiciones pueden ser apreciados en la Figura 4.9.

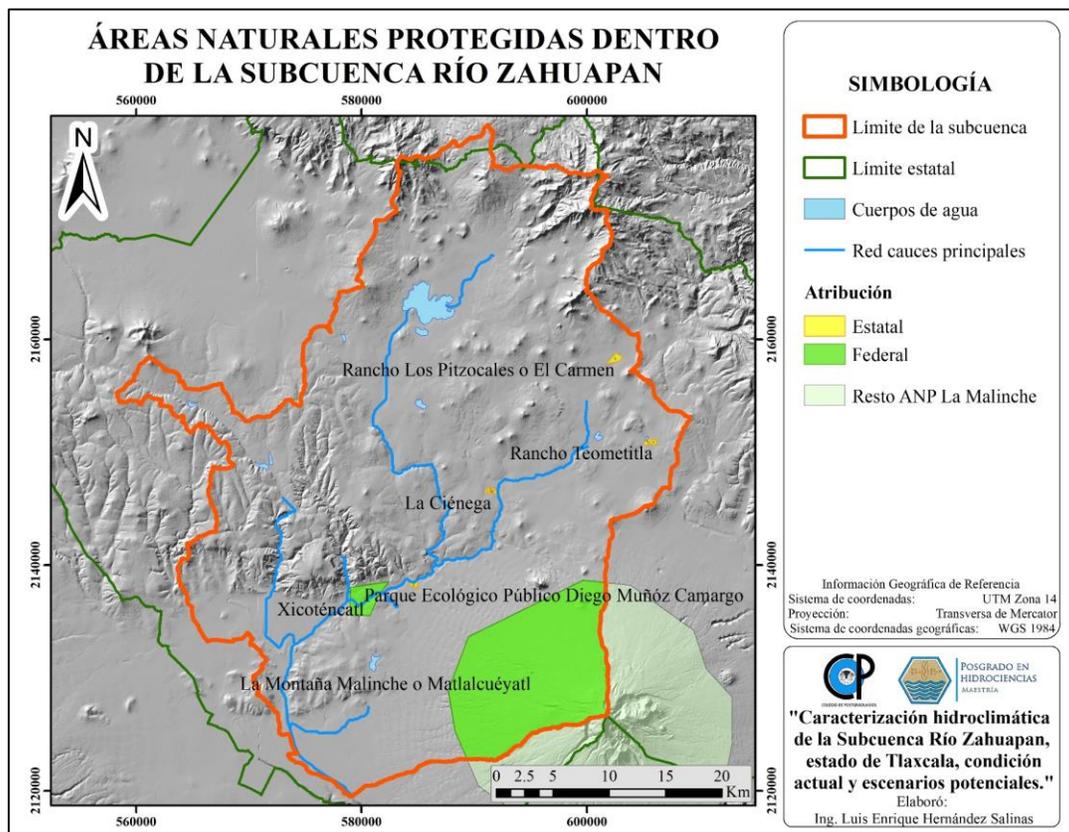


Figura 4.9.- Áreas Naturales Protegidas dentro de la subcuenca del río Zahuapan.

Cuadro 4.6.- Áreas Naturales Protegidas de Carácter Estatal en la subcuenca del río Zahuapan.

Nombre	Fecha de decreto	Categoría	Superficie (ha)
Rancho Los Pitzocales o El Carmen	12/11/2002	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	62.637
Rancho Teometitla	13/08/1997	Zona sujeta a Reserva Ecológica	48.22
La Ciénega	06/07/1994	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	42.59
Parque Ecológico Público Diego Muñoz Camargo	05/10/1998	Zona sujeta a Reserva Ecológica	30.08

Cuadro 4.7 Áreas Naturales Protegidas de Carácter Federal en la subcuenca del río Zahuapan.

Nombre	Categoría	Fecha de decreto	Superficie (ha)
La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl	Parque Nacional	06/10/1938	15,364.38
Xicoténcatl	Parque Nacional	17/11/1937	653.62

El Parque Nacional La Malinche se encuentra sobre territorio Poblano y Tlaxcalteca, para este último dicha superficie también es subdividida por la determinación fisiográficas de las subcuencas en el estado, siendo la superficie total dentro de la subcuenca de estudio solo del 33.3% de las 46,112.24 ha totales del ANP. La importancia de conocer estas áreas de conservación va ligada al objetivo de la tesis, al conocer cuáles son los principales retos que enfrentarían estos ecosistemas naturales en el esfuerzo de conservación de los recursos naturales ante el fenómeno de cambio climático.

4.2.7. Uso agrícola de la tierra

El estado de Tlaxcala posee una larga historia, la ocupación del territorio se remonta hacia los primeros pobladores hacia el 1800 a.C., los cuales ya realizaban prácticas agrícolas muy rudimentarias, pero con lo cual inicio un proceso lento y constante de la transformación del entorno. Posteriormente, en los últimos siglos de la época prehispánica, el cultivo de maíz, frijol y calabaza estaba ampliamente generalizado, no solo en los valles sino también en sistemas de terrazas que fueron creados para aprovechar el terreno accidentado característico de algunas zonas del estado. Actualmente el uso de la tierra con fines agrícolas continúa dominando el paisaje.

Es aquí donde se realizan algunas observaciones sobre los retos que suponen el uso de información procedente de distintas fuentes oficiales. En la Figura 4.8 puede observarse la

distribución generalizada de los distintos tipos de agricultura que se realizan dentro de la subcuenca, se aprecian zonas continuas producto de la clasificación realizada a escala 1:250,000 por INEGI; sin embargo, en la Figura 4.10 se muestra la distribución de tierras agrícolas presentes en la cobertura Frontera Agrícola Serie II generada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la cual ha sido elaborada a partir de técnicas de interpretación visual, procesamiento de imágenes de satélite de la constelación SPOT y muestreos en campo. El grado de detalle en esta última es superior a cualquier otro producto público, y pretende ser la base para estudios territoriales.

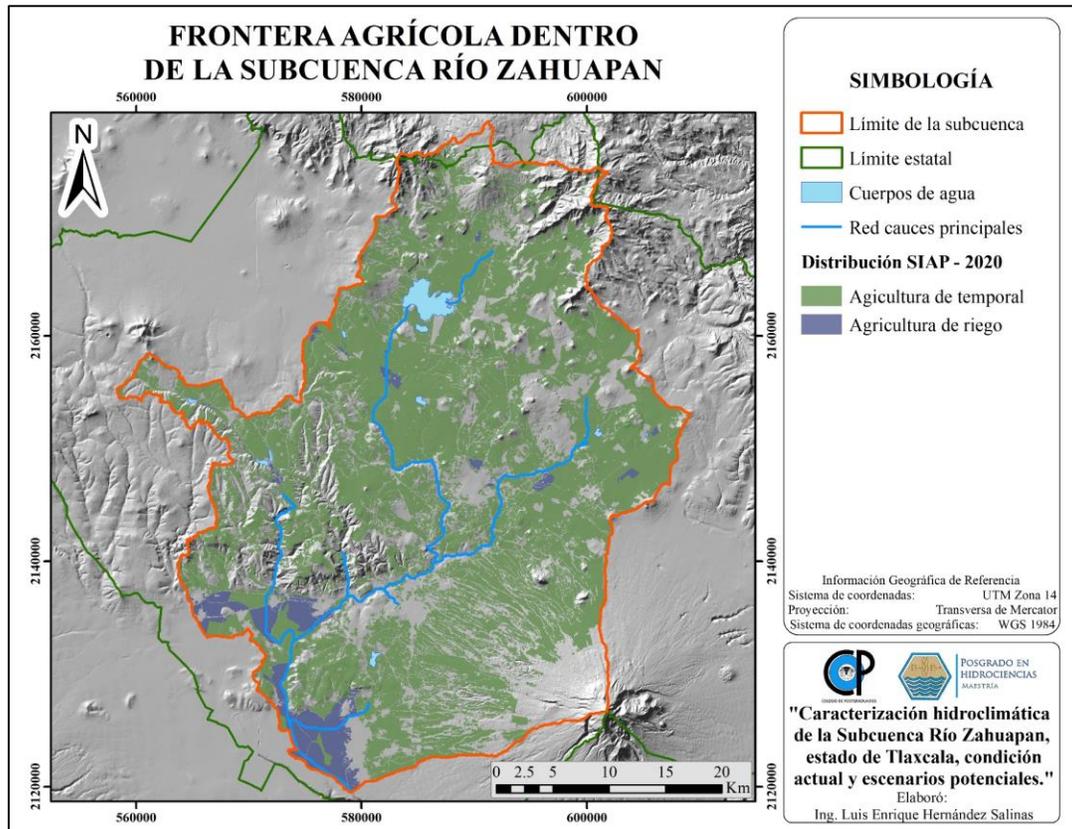


Figura 4.10.- Frontera agrícola Serie II - SIAP.

Como se observa en la Figura 4.10, esta fuente de información excluye áreas que comprenden depresiones del terreno, poblaciones puntuales, entre otras. Definiendo 91,440.3 ha como superficie de temporal y 6,115.98 de riego, para sumar un total de 97,556.25 ha contra las

118,005.68 ha consideradas en la Serie VI de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, donde 105,032.68 ha y 12,973 ha son de temporal y riego, respectivamente.

Otra fuente de información sobre el uso agrícola de la tierra, y de manera particular acerca de la distribución de superficies de riego en la subcuenca, son las generadas por CONAGUA, quienes han publicado las coberturas de los Distritos de Riegos y Unidades de Riego, siendo las más recientes las correspondientes al ciclo 2018-2019 y 2017-2018, respectivamente. Desplegadas en la Figura 4.11, de ellas es posible apreciar que las 8,760.39 ha correspondientes a las unidades de riego dentro de la zona de estudio y las 2,215.69 ha pertenecientes al Distrito de Riego 056 (de un total de 4,311 que comprende), obedecen a una distribución similar con el par de fuentes antes descritas en la mayoría de los casos, sin embargo, dichas superficies no coinciden con el área reportada como agricultura de riego por ellas.

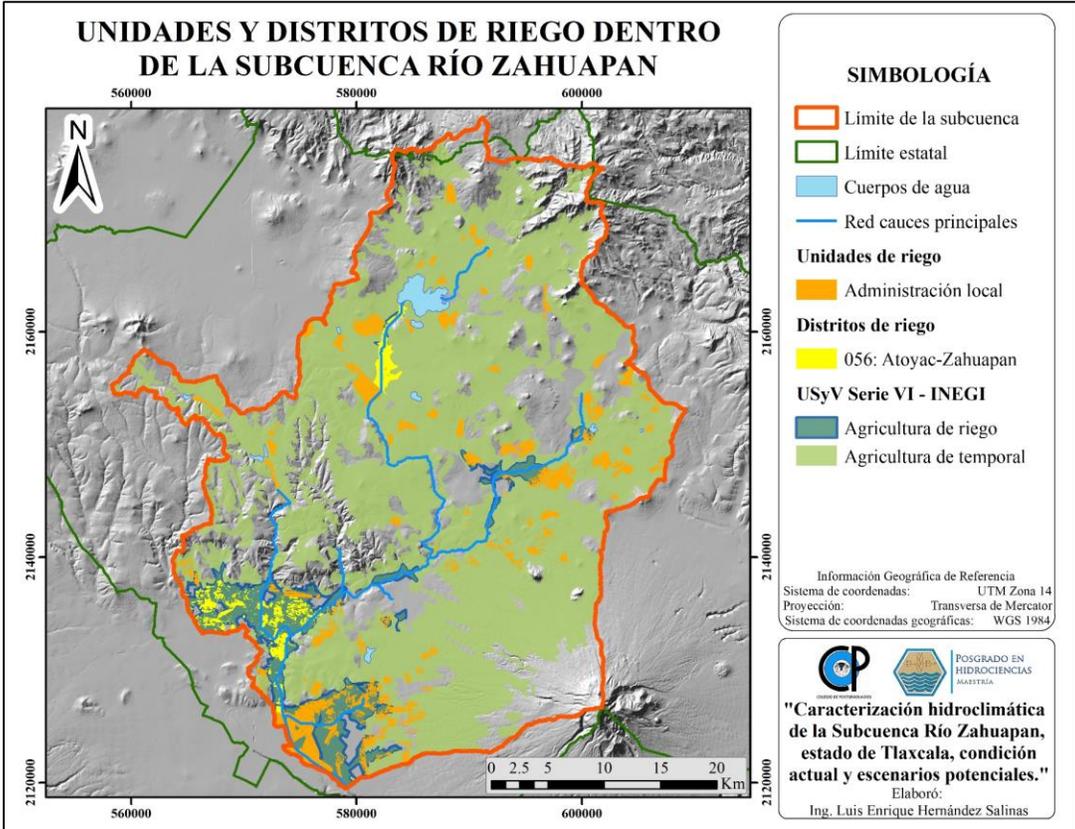


Figura 4.11.- Distritos y Unidades de Riego - CONAGUA.

Uno de las mayores dificultades con el manejo del territorio a través de un enfoque de cuenca es el hecho de que los límites definidos por las unidades fisiográficas casi nunca coinciden con los límites político-administrativos establecidos, para la cuenca bajo estudio este problema es recurrente en cuando menos 25 municipios cuya superficie es segmentada por la línea divisoria de aguas.

Para analizar la productividad agrícola en la subcuenca se dificulta la obtención de información detallada espacialmente desde el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), ya que las bases de datos están integradas por lo reportado a nivel municipal, sin embargo, con la intención de realizar una caracterización de los principales cultivos presentes en el territorio se decidió concentrar los registros de los 27 municipios que pertenecen en su totalidad a la subcuenca, además de aquellos cuya superficie política y cobertura agrícola es mayoritaria dentro del área de estudio, siendo: Santa Catarina Ayometla (89%), Tetlatlahuca (88%), Muñoz de Domingo Arenas (87%), Santa Apolonia Teacalco (82%), San José Teacalco (78%), Zacatelco (75%), Santa Ana Nopalucan (69%) y Teolochocho (64%).

De esta manera es que fueron excluidos en su totalidad los municipios de Tocatlán, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Hueyotlipan, Tlaxco, Xicohtzingo, Mazatecochco de José María Morelos, Lázaro Cárdenas, Papalotla de Xicohtécatl, Nativitas, Terrenate, Sanctórum de Lázaro Cárdenas, San Pablo del Monte, Españita, Huamantla, Tepetitla de Lardizábal, y los poblanos de Chignahuapan e Ixtacamaxtitlán, por la sobrestimación que podrían causar de los indicadores de agricultura para la subcuenca.

Cuadro 4.8.- Cultivos de riego presentes en el ciclo 2019-2020 reportados por SIAP para los municipios considerados dentro de la subcuenca del río Zahuapan.

Ciclo productivo	Cultivo	Superficie cosechada (ha)	Volumen de producción (ton)	Rendimiento promedio (ton/ha)	Precio promedio (\$/ton)	Valor de producción (\$)
Primavera-Verano	Maíz grano	7,116	24,879.35	3.41	3,200.74	80,224,973.05
	Tomate verde	113	1,811.45	14.99	4,785.13	8,879,587.41
	Avena forrajera en verde	360	7,204.10	20.51	690.93	4,948,680.58
	Maíz forrajero en verde	218	6,769.70	33.7	489.58	3,219,481.94
	Tomate rojo (jitomate)	8	679.5	106.75	4,120.30	2,794,753.50
	Frijol	247	233.83	0.96	11,636.97	2,721,072.66
	Trigo grano	106	381.6	3.6	4,072.79	1,554,299.57
	Zempoal-xochitl	14	79.78	5.78	10,052.74	804,624.78
	Cebolla	3	67.8	22.6	7,373.33	499,911.77
	Elote	11	181.5	16.5	2,690.91	488,400.17
	Huauzontle	4	38	9.5	3,973.75	151,002.50
Otoño-Invierno	Avena forrajera en verde	471	9,067.43	18.98	639.58	5,816,825.89
	Avena grano	55	129.98	2.27	4,667.63	632,031.11
	Tomate verde	11	72.6	6.6	5,921.61	429,891.26
	Ajo	4	25.2	6.3	13,222.50	333,207.00
Perennes	Alfalfa verde	1,085	71,825.29	66.71	727.53	54,186,667.64
	Aguacate	25	197.5	7.9	16,700.00	3,298,250.00
	Durazno	29	188.5	6.5	11,625.00	2,197,000.00
	Manzana	8	60	7.5	12,090.00	725,700.00
	Rosa*	1	1,090.00	1,090.00	330	359,700.00

*Para este cultivo la unidad de medición es gruesa (docena de docenas).

Cuadro 4.9.- Cultivos de temporal presentes en el ciclo 2019-2020 reportados por SIAP para los municipios considerados dentro de la subcuenca del río Zahuapan.

Ciclo productivo	Cultivo	Superficie cosechada (ha)	Volumen de producción (ton)	Rendimiento promedio (ton/ha)	Precio promedio (\$/ton)	Valor de producción (\$)
Primavera - Verano	Maíz grano	33,724	95,334.08	2.82	3,203.29	310,767,411.20
	Trigo grano	8,499	24,769.50	2.95	3,811.59	97,030,431.21
	Avena forrajera en verde	5,316	93,188.48	14.89	665.4	52,084,461.87
	Cebada grano	3,414	8,679.99	2.54	4,326.70	37,601,348.09
	Maíz forrajero en verde	977	34,309.70	30.21	531.23	16,055,436.35
	Frijol	683	662.08	0.95	11,839.51	7,924,712.11
	Avena grano	585	1,513.50	2.6	3,150.00	4,766,795.73
	Papa	29	536.5	18.5	4,482.59	2,404,909.54
	Zempoal-xochitl	31	176.55	5.67	10,347.52	1,826,595.05
	Tomate verde	9	79.88	10.54	5,223.63	358,579.20
Perennes	Maguey pulquero*	199	14,065.95	56.79	2,227.50	39,255,622.63
	Durazno	18	86.4	4.8	15,747.78	1,360,608.19
	Manzana	7	79.03	11.49	6,515.00	514,812.90
	Pera	1	16.1	16.1	1,525.00	24,552.50

*Para este cultivo la unidad de medición es miles de litros.

La superficie agrícola condicionada al agua de lluvia es dominante en las actividades productivas dentro de la subcuenca, sobre todo la producción de granos básicos bajo esta modalidad, por lo cual es de importancia conocer el comportamiento que podría esperarse sobre la distribución espacial y temporal de las precipitaciones bajo escenarios de cambio climático, a fin de identificar amenazas y considerar el diseño de acciones de adaptación a las nuevas condiciones ambientales.

4.2.8. Uso potencial del suelo

INEGI ha generado una cobertura de uso agrícola potencial de los suelos para el territorio nacional, el cual considera las características edafológicas locales y su capacidad de sostener actividades productivas. En la Figura 4.12 se muestra la distribución de uso agrícola reportado en la Serie VI de USyV sobre la cual se sobreponen la categorización de tierras como suelos aptos y no aptos para el uso agrícola, así como la interacción de estas coberturas con las poligonales de áreas de conservación de carácter federal.

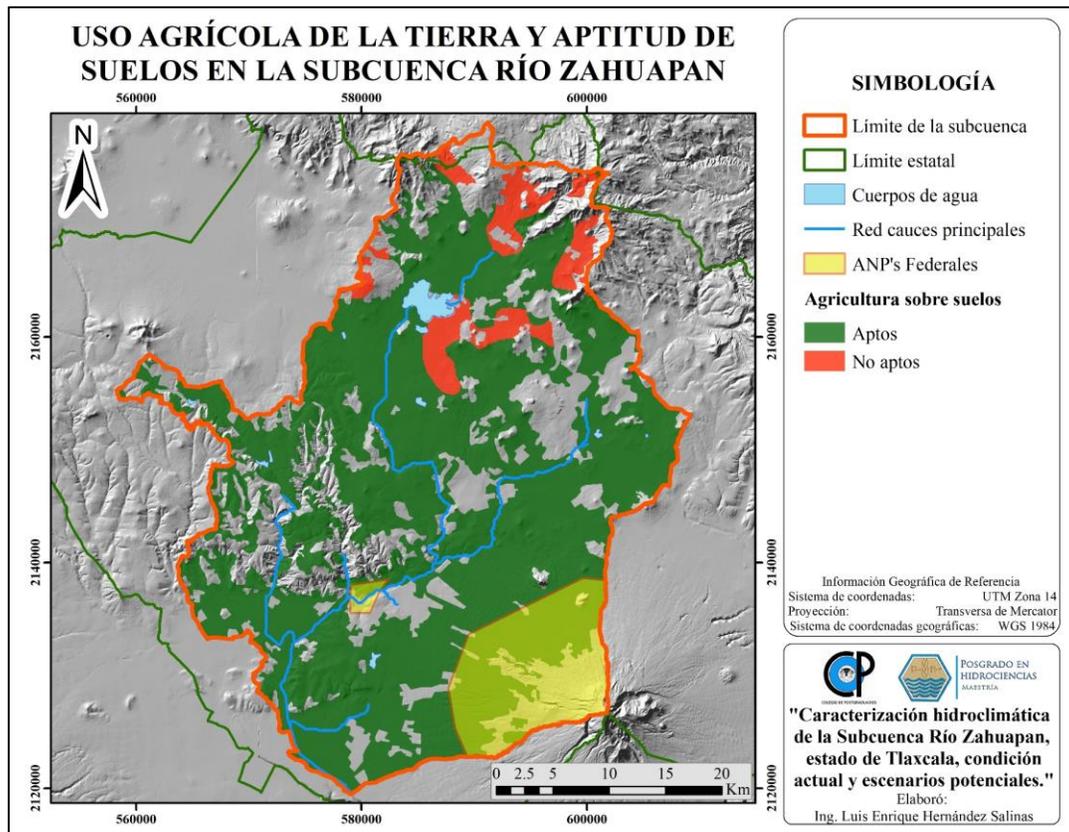


Figura 4.12.- Uso Agrícola de la Tierra en la subcuenca del río Zahuapan.

Aunque no es posible definir de manera inmediata las condiciones por las cuales se manifiestan estas tendencias de uso agrícola de suelos no aptos para tal actividad, pues ello requiere de un análisis del trasfondo de las características económicas y sociales de la zona de estudio, si podemos prestar atención a que en dichas áreas se debe de priorizar acciones de conservación de suelo y agua para permitir un desarrollo agrícola, ya existente, de una manera más óptima para evitar la generación o continuidad de procesos de erosión y sobreexplotación del suelo. Lo anterior se resume en el Cuadro 4.10, también debe prestarse atención a la superficie que actualmente desarrolla agricultura y se encuentra dentro de las poligonales de las Áreas Naturales Protegidas de carácter Federal.

Cuadro 4.10.- Desarrollo Agrícola Sobre Distintas Aptitudes de Suelo para Dicha Actividad.

Condición	Superficie (ha)
Agricultura en suelo apto	107,308.14
Agricultura en suelo no apto	7,969.04

También es adecuado considerar la aptitud de los suelos para actividades forestales, y cuya actual cobertura vegetal o uso de suelo sea diferente al forestal, no indicando necesariamente que deba de realizarse una conversión de las actividades, pero sí que dicho potencial podría representar el establecimiento de plantaciones forestales o el emprendimiento de sistemas de agroforestería que permita generar mejores condiciones ambientales, propiciando la conservación de suelo y agua, y a la vez que signifiquen oportunidades económicas para los poseedores de las tierras. La Figura 4.13 representa dichas zonas de interés.

Cuadro 4.11.- Uso y Cobertura Vegetal Actual en Suelos con Potencial Forestal en la subcuenca del río Zahuapan.

Uso y cobertura actual	Superficie (ha)
Agricultura	28,408.77
Bosque de coníferas	5,629.33
Vegetación secundaria	5,578.85
Pastizal inducido	4,150.50
Bosque de encino	1,523.03
Bosque de táscate	841.56
Pradera de alta montaña	172.14
Sin vegetación aparente	15.39

Con caracteres descriptivos de esta condición, el Cuadro 4.11 condensa la información de las zonas potenciales con distinto uso de suelo y cobertura actual, representando numéricamente el área de oportunidad para el desarrollo de proyectos forestales en el estado.

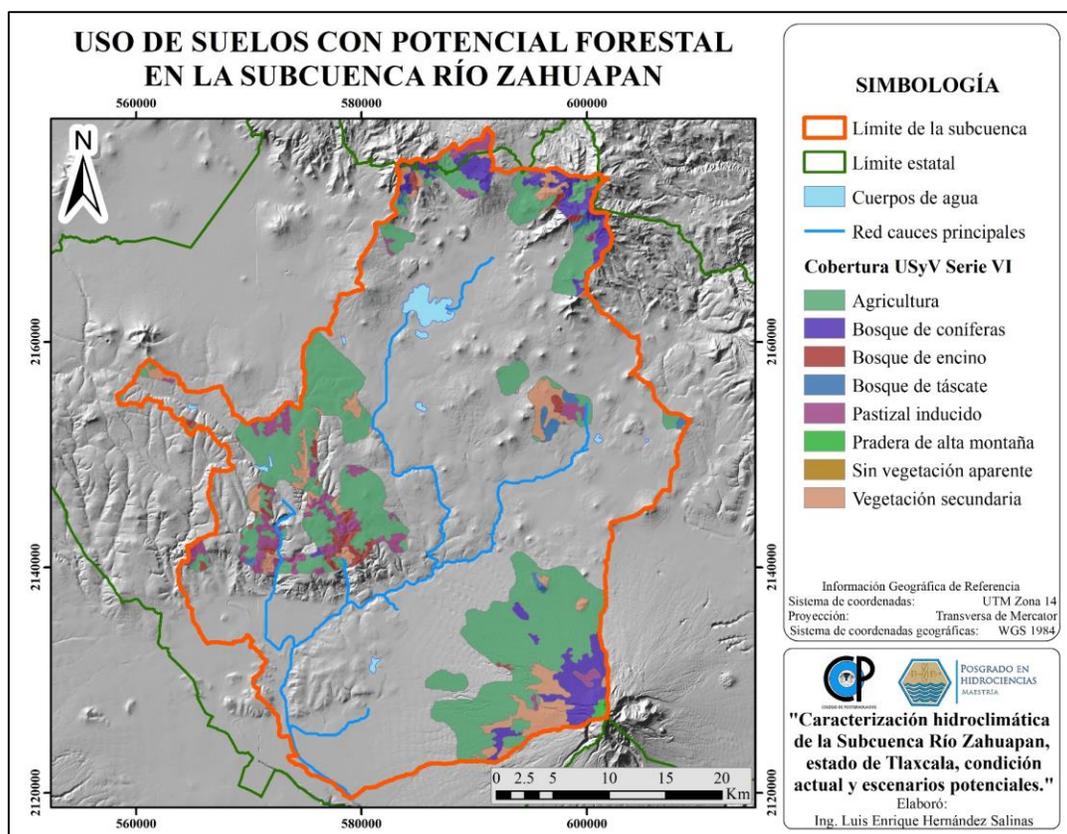


Figura 4.13.- Zonas con Uso Potencial Forestal en la subcuenca del río Zahuapan.

4.2.9. Población

De acuerdo son los datos reportados por INEGI para el censo de población y vivienda 2020, en la subcuenca habitan 829,431 personas, de las cuales 825,298 radican en 202 poblaciones de más de 100 habitantes, mientras que 354 comunidades con menos de 100 habitantes concentran a las 4,133 personas restantes. Existen 16 centros de población con más de 10,000 habitantes, en los que residen el 43.7% del total de la subcuenca, siendo los de mayor tamaño las urbes de Santa Ana Chiautempan (53,373), Apizaco (47,632), Zacatelco (45,587), Contla (30,417) y Ocotlán (24,342).

El crecimiento poblacional ha sido una constante en el territorio, como puede observarse en el Cuadro 4.12, mismo que concentra los principales estadísticos de la población dentro del territorio de la subcuenca a partir de la información reportada en los censos de población y vivienda 2000, 2010 y 2020 generados por INEGI, además de las bases de datos del índice de marginación a nivel municipal para el mismo intervalo elaborados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

Debe mencionarse que debido a que en el estado de Tlaxcala se crearon nuevos municipios aún en el año 1994, como lo fue el caso de La Magdalena Tlalteluco o Lázaro Cárdenas, es difícil realizar el seguimiento para de la población para el Censo 1990, así como para la comparativa del número de municipios en determinado grado de marginación. En el Cuadro 4.12 solo se integran los municipios pertenecientes al territorio tlaxcalteca, excluyendo ambos municipios poblanos presentes debido a que su superficie dentro de la subcuenca es considerablemente pequeña y que al tratarse de serranías no presentan asentamientos poblacionales dentro del área de estudio.

Cuadro 4.12.- Principales descriptores de la población dentro de la subcuenca río Zahuapan.

Atributo	Año		
	2000	2010	2020
Población total (No. De habitantes)	598,824	727,322	829,431
Número de centros de población con más de 10,000 habitantes	10	13	16
Porcentaje de población que habitan en comunidades menores a 5,000 habitantes	37%	38%	33%
Población económicamente activa (No. De habitantes)	207,766.00	288,992.00	396,590.00
Población desocupada (No. De habitantes)	2,792.00	14,153.00	9,919.00
Municipios con grado de marginación muy alto	-	-	-
Municipios con grado de marginación alto	4	1	-
Municipios con grado de marginación medio	13	17	-
Municipios con grado de marginación bajo	27	25	10
Municipios con grado de marginación muy bajo	11	9	40

El paisaje regional se integra por tres factores dominantes que lo explican y que distinguen claramente a las poblaciones del centro y suroeste de otras áreas, región que concentra la mayor cantidad de población. Siendo: (1) el ser una zona anegadiza, donde la ubicación con respecto a las fuentes permanentes de agua ha generado situaciones particulares de su uso y que han propiciado actividades económicas agrícolas, ganadera de pequeña escala e industrial; (2) las condiciones climáticas locales que le permiten a la región centro y suroeste estar relativamente protegida de las inclemencias climáticas, y, (3) el tipo de suelos y sus características que han permitido la productividad agrícola (González, 2009).

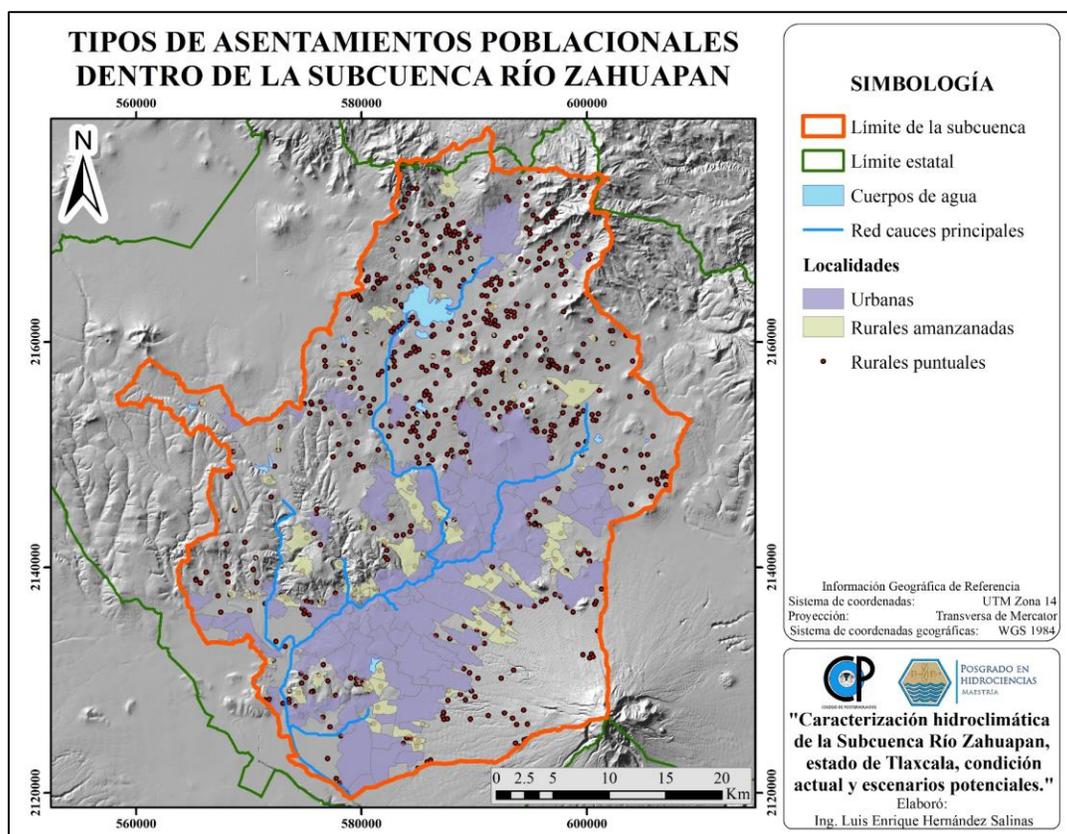


Figura 4.14.- Distribución espacial del tipo de asentamientos poblacionales en la subcuenca.

De acuerdo al análisis de las coberturas observadas en la Figura 4.14 podemos mencionar que las zonas a ser consideradas ocupadas por localidades de carácter urbano cubren 41,011.28 ha, sin ser necesariamente de uso de suelo exclusivamente urbano, mientras que la presencia de localidades rurales ameznadas suma una superficie de 9,181.42 ha, encontrándose también 658 comunidades rurales puntuales dentro del territorio de la subcuenca.

4.3. Delimitación de la cuenca hidrográfica

A pesar de existir una delimitación ya realizada que es posible consultar en el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), desarrollado por INEGI con versión 3.2, en la misma se definen 4 sitios como puntos de drenaje debido a la existencia de un sistema de canales en una reducida zona agrícola del suroeste del estado. En el presente proyecto se optó por desarrollar un trazo de la superficie de drenaje a partir de un único punto de salida atendiendo a la definición del concepto de cuenca hidrográfica y que represente lo que correspondería a las

escorrentías por presentarse de manera natural dada la orografía de la zona, punto que se determinó de manera deliberada en el cauce principal del río Zahuapan antes de que este aporte sus aguas al río Atoyac cuyos escurrimientos provienen de la sierra nevada en el estado de Puebla. La determinación de este sitio como boquilla de la cuenca obedece de igual manera a la presencia de la Estación Hidrométrica 18140-Xicotzingo, la cual presenta registros para los intervalos 1940-1943, 1977-1981 y 1988-1997, lo cual permitirá tener valores de referencia contra los cuales puedan ser comparados los volúmenes de escorrentía simulados.

El proceso de delimitación de la subcuenca se realizó a partir de recursos digitales correspondientes al Continuo de Elevaciones Nacional con resolución espacial de 15 metros publicado por INEGI y mediante el complemento ArcSWAT para el *software* ArcMap 10.1. Los pasos realizados para llevar a cabo el proceso de delimitación automática se explican de manera específica en las siguientes secciones.

4.3.1. Modelos de altimetría

INEGI (s.f.) describe a los Modelos Digitales de Elevación (MED) como una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, conteniendo esos valores en un archivo de tipo *raster* con estructura regular. Este tipo de recursos son utilizados en una diversidad de aplicaciones como son la geodesia y fotogrametría, ingeniería civil, planeación y manejo de recursos naturales, ciencias de la tierra, en aplicaciones militares, cartografía especializada, prevención y atención a desastres naturales, entre otras. La elaboración de los MDE puede realizarse mediante dos grupos de métodos:

Directos. - A partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, pudiendo ser por medio de levantamientos topográficos con estación total o con GPS, o mediante el uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como radar o láser.

Indirectos. – Al emplear documentos analógicos o digitales elaborados previamente, ya sea la digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión, o la restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

Los métodos que emplea actualmente el INEGI para la generación de los MDE son: 1) la generación a partir del método fotogramétrico de correlación cruzada; 2) tecnología LiDAR (acrónimo de *Light Detection and Ranging*); y, 3) digitalización de cartografía topográfica

Como fue mencionado anteriormente el MDE a emplearse fue acotado a la región de interés y descargado desde la plataforma de INEGI y posteriormente proyectado a la proyección Universal Transversa de Mercator Zona 14 Norte y Datum WGS 1984.

4.3.2. SWAT

El *software* SWAT es considerado un modelo de transporte hidrológico de cuenca, siendo empleado en todo el mundo gracias a sus características y continuo desarrollo. Se trata de un modelo de tiempo continuo que opera en un paso de tiempo diario a escala de cuenca. Su objetivo es predecir los impactos a largo plazo del manejo y el momento de las prácticas agrícolas dentro de un año (Uribe, 2010). Se ha usado ampliamente para simular a escala de cuenca el ciclo del agua, y la dinámica de los nutrientes en paisajes cuyo uso dominante sea la agricultura, también puede emplearse para evaluar la eficiencia ambiental de las mejores prácticas de manejo y políticas de gestión alternativas (Molina-Navarro *et al.*, 2016 y López-Lambráño *et al.*, 2020).

Al emplear un esquema de desagregación de dos niveles lleva a cabo una identificación preliminar de la subcuenca basada en criterios topográficos, seguida de una mayor discretización considerando el uso del suelo y las características de los tipos de suelo. Las áreas con las mismas características topográficas, tipo de suelo, uso y manejo de la tierra forman una Unidad de Respuesta Hidrológica (URH), una unidad computacional básica que se supone es homogénea en la respuesta hidrológica (Aguayo *et al.*, 2016).

El emplear el complemento ArcSWAT deriva de lo concluido por Litan (2018), quien observó que en el proceso de delimitación automática de una cuenca se obtuvieron mejores resultados al emplear dicha herramienta sobre los productos del empleo del conjunto ArcHydro y las herramientas ArcGIS Hydrology.

4.3.3. Ejecución de la delimitación automática

La descarga del complemento ArcSWAT se realizó desde el portal del Soil & Water Assessment Tool, cuya descompresión e instalación es bastante sencilla. La versión del complemento utilizado es la 2012.10_1.18, última versión para el *software* ArcMap 10.1 empleado para este trabajo.

Ya instalado el complemento se debe iniciar el programa ArcMap, para después activar la barra de herramientas del ArcSWAT desde donde se genera un nuevo proyecto, el cual debe de enlazarse a un directorio específico, siendo una carpeta previamente creada en el directorio Temp del disco C:\, es muy importante que en la pestaña “Seguridad” de las propiedades de la carpeta elegida se permita el acceso y modificación a todos los usuarios al directorio en cuestión para permitirle al complemento la manipulación de archivos.

Una vez abierto ArcMap y vinculada la carpeta referente al proyecto, es empleado el comando *SWAT Project Setup > New SWAT Project*. Una vez creado el proyecto de manera exitosa, se realizó la delimitación automática desde la opción *Watershed Delineator > Automatic Watershed Delineation*, lo cual despliega la ventana señalada en la Figura 4.15, en la cual se realizan todos los procedimientos y elecciones para la delimitación automática de la cuenca, asimismo los procesos están condicionados a solo avanzar si ya se encuentra ejecutado de manera exitosa el comando anterior. Primero debe seleccionarse el archivo correspondiente al MDE donde se ubicará el área de estudio, posterior a ello en ajustes de proyección para unidades “Z” se elige metros debido a la proyección geográfica que posee el modelo digital de elevación, lo cual muestra en la ventana de ArcMap el MDE corregido mediante un proceso de rellenado de inconsistencias, de manera similar el *software* ArcMap posee para este proceso la herramienta “*Fill*”.

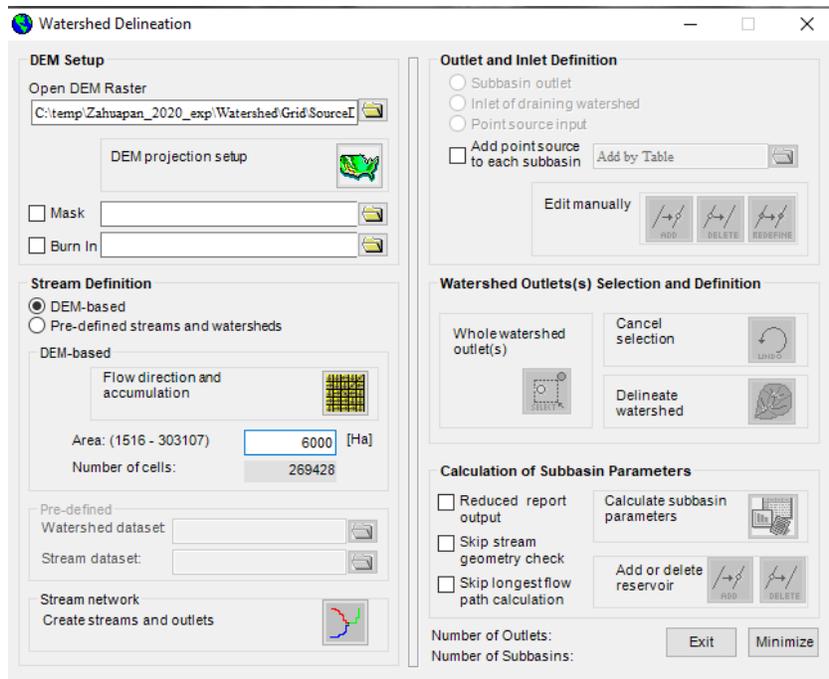


Figura 4.15.- Interfaz del proceso de delimitación automática mediante el complemento ArcSWAT.

Después es calculado la dirección y acumulación de flujos dando presionando el botón dentro de la sección *DEM-based*, con lo cual se despliega el número total de celdas analizadas, así como el intervalo de hectáreas sugerido para determinar como el “*threshold*” (umbral) que definirá el área de aportación máxima en la construcción de las subcuencas y de la red de drenaje, en este caso se determinó un área de 6000 ha. Siendo calculados estos parámetros, la red de flujos y puntos de monitoreo para cada subcuenca son generados dando clic en el botón respectivo.

Realizados los pasos anteriores es posible visualizar la red de drenaje generada (Figura 4.16) en el área, así como los nodos de esta, en este punto es posible realizar modificaciones sobre los nodos de la red de drenaje en función del criterio del usuario, para lo cual se disponen de las opciones en el apartado “*Outlet and Inlet Definition*” de la interfaz, posteriormente se debe seleccionar el punto de drenaje de la cuenca que se desea construir, ya sea un nodo generado automáticamente o construido de manera manual por el usuario, para el presente proyecto se creó un nodo en la proximidad a la estación hidrométrica 18140-Xicotzingo, mismo que se seleccionó como salida de la cuenca, mediante el botón “*Whole watershed outlet(s)*” y finalmente con el botón “*Delineate watershed*” se obtendrá la delimitación de la cuenca de interés.

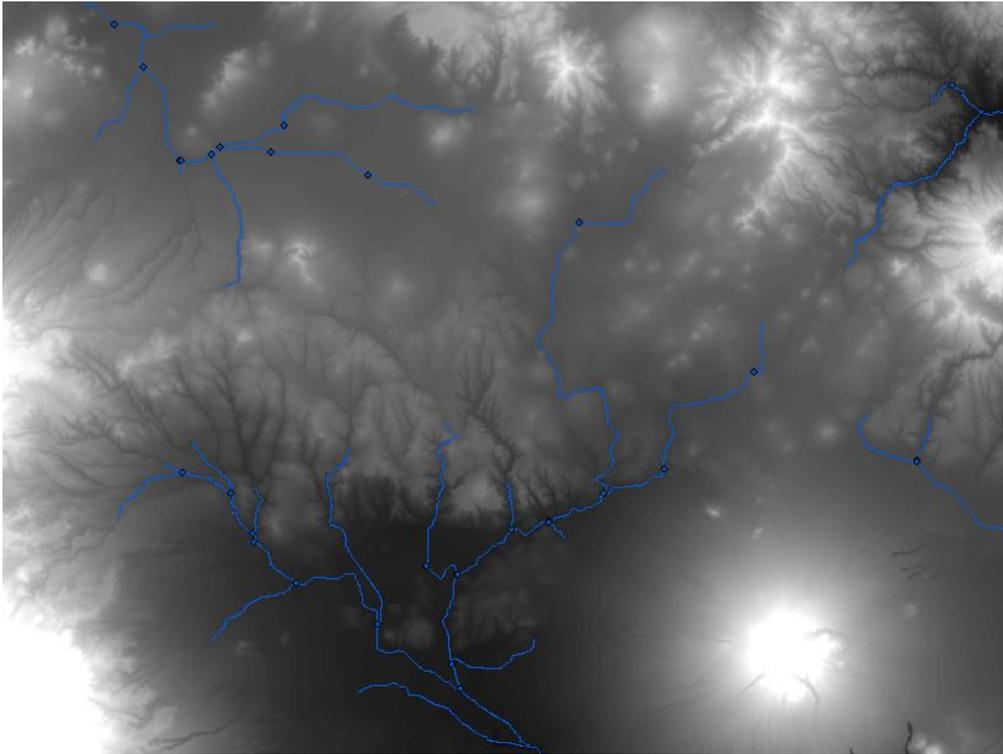


Figura 4.16.- Red de drenaje generada.

Hasta este punto ya se encuentra delimitada la cuenca, pero es necesario agregar más información útil para el análisis de los parámetros morfológicos de la misma. Para generar dicha información debe de hacerse clic en el botón correspondiente “*Calculate Subbasin Parameters*”, terminado el proceso se tendrán delimitadas las subcuencas y sus parámetros quedarán definidos en su tabla de atributos.

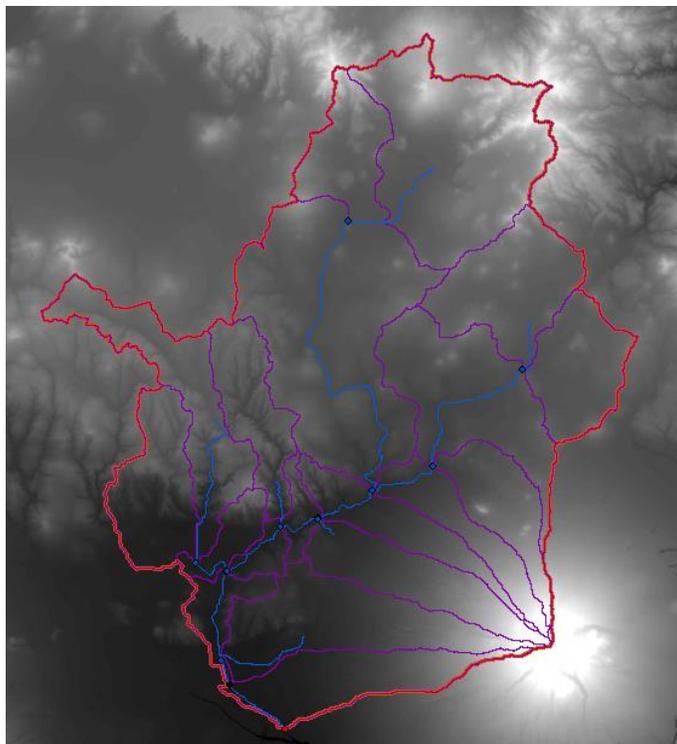


Figura 4.17.- Proceso de construcción de subcuencas.

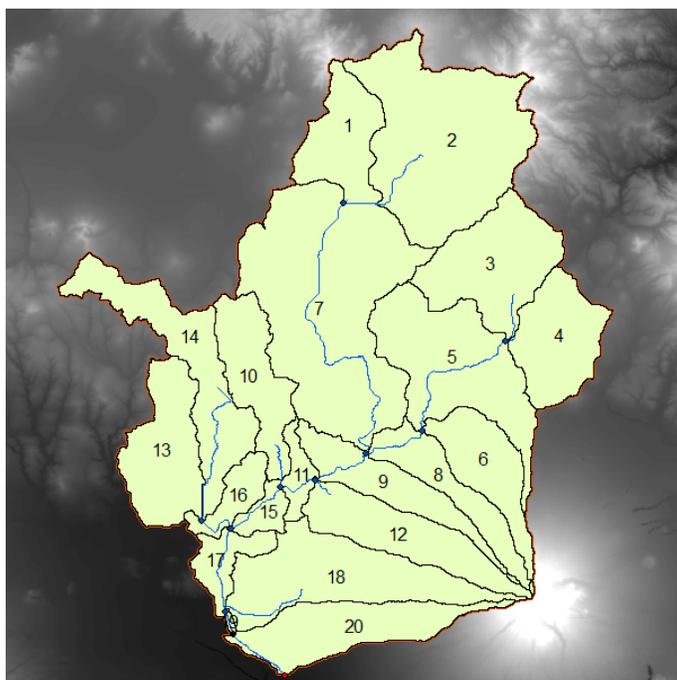


Figura 4.18.- Cuenca y subcuencas generadas.

El proceso de delimitación automática de una cuenca a partir de un MDE y mediante uso del módulo ArcSWAT proporciona una manera eficiente y rápida de delimitar una cuenca hidrográfica con sus respectivas subcuencas y red de drenaje. En este caso se logró delimitar de manera exitosa la subcuenca de interés, la cual queda definida como el área de estudio, ésta posee un área de 1,646.62 km² y un perímetro de 296.58 km, su rango altitudinal es de 2,173 a 4,407 metros sobre el nivel del mar, de acuerdo al criterio de 6000 ha como umbral para determinar la acumulación de escurrimientos y formación de corrientes se obtuvo una subdivisión en 20 subcuencas.

La selección del umbral de acumulación de flujos para la generación de la red de cauces y subcuencas parte de lo descrito por Azizian y Shokoohi (2015), quienes consideraron adecuado establecer el umbral en un intervalo del 0.5 y 3% de la superficie total de la cuenca, de esta manera para la subcuenca de estudio un área de 4,940 ha representa el 3% del área de la misma. Sin embargo, Miao-Wu *et al.* (2017) establecieron que para cuencas de gran tamaño en distintas regiones de China un umbral de entre 5,000 y 200,000 ha pudo generar una red de cauces adecuada. Aunque considerando lo discutido en Yunxiang *et al.* (2011) donde se aborda que “para obtener un mejor resultado de extracción de la corriente, el área de drenaje corriente arriba requerida para definir el comienzo de una corriente debe ajustarse repetidamente”, es que se realizaron distintas evaluaciones concluyendo finalmente que la elección del umbral de 6,000 ha representaba una red de cauces bastante similar a la red de cauces reportados como perennes en el SIATL, y que podría servir como una representación teórica de las características morfométricas de la subcuenca.

4.4. Análisis morfométrico

4.4.1. Área y perímetro de la cuenca

El área de la cuenca (Ac), es el área de la proyección horizontal del parteaguas. La cuenca propuesta posee un perímetro de **296.58 km**, así como un área de **1,646.62 km² (164,662 ha)**, lo cual la define como una cuenca chica de acuerdo a la clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño realizada por INEGI.

4.4.2. Forma de la cuenca

a) Descripción cualitativa

La forma de la cuenca es irregular, geoméricamente no se asemeja a ningún polígono regular, aunque de manera más subjetiva podría aproximarse a un ovalo.

b) Factor de forma

Para la obtención de un índice cuantitativo referente a la forma de la cuenca se hace uso de la siguiente ecuación propuesta por Horton en 1932:

$$Rf = \frac{Ac}{Lb^2} \quad (4.1)$$

Donde:

Rf = Factor de forma (adimensional)

Ac = Área de la cuenca (km²)

Lb = Longitud de la corriente principal (km)

Entonces:

$$Rf = \frac{1,646.62}{78.29^2} = 0.269$$

Por lo que se considera que posee una forma alargada.

c) Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

Este parámetro es un indicador de la regularidad geométrica de la forma de la cuenca, se trata de la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo cuya superficie es la misma que la del área de la cuenca. La fórmula descrita por Horton en 1945 es:

$$Kc = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.2)$$

Donde:

Kc = coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (adimensional)

P = perímetro de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km²)

Entonces:

$$K_c = 0.282 * \frac{296.58}{\sqrt{1,646.62}} = 2.06$$

El valor obtenido ubica a la cuenca en una clase de forma III: oval-oblonga a rectangular-oblonga

d) Relación de elongación

Se trata del cociente entre el diámetro de un círculo con la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca, siendo esta última considerada una línea recta paralela al cauce principal desde el punto de drenaje hasta el extremo del parteaguas. La fórmula definida por Schumm (1956) es:

$$R_e = \frac{2}{L_c} * \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5} \quad (4.3)$$

Donde:

R_e = relación de elongación (adimensional)

L_c = longitud del cauce principal (km)

A = área de la cuenca (km²)

Entonces:

$$R_e = \frac{2}{78.29} * \left(\frac{1,646.62}{\pi}\right)^{0.5} = 0.585$$

Lo cual corresponde a una cuenca de forma alargada.

e) Relación de circularidad

Es la relación entre el área de un círculo con el mismo perímetro de la cuenca y el área de la misma, la fórmula expresada por Miller en 1953 queda definida como:

$$R_c = 4\pi * \frac{A}{p^2} \quad (4.4)$$

Donde:

R_c = relación de circularidad (adimensional)

A = área de la cuenca (km^2)

P = perímetro de la cuenca (km)

$$R_c = 4\pi * \frac{1,646.62}{296.58^2} = 0.235$$

Dicho valor corresponde a una cuenca de forma oblonga.

4.4.3. Aspectos lineales del sistema de cauces

Las relaciones lineales de caracterización de las cuencas son en relación con su longitud, área y su red de cauces o hidrografía.

A. Hidrografía

La hidrografía de la cuenca está representada por el desarrollo de todos los cauces de concentración de ella. Los cauces se siguen a partir de su salida y se llegan hasta sus límites o parteaguas. Los cauces principales o corrientes son los que concentran al escurrimiento total y los tributarios son los que conducen las corrientes al cauce principal.

Para la subcuenca se observa que posee una red hidrográfica medianamente desarrollada del tipo dendrítica, donde el río Zahuapan recorre la parte central de la cuenca en un sentido norte a sur, cabe señalar que dicho cauce es de carácter perenne al igual que los tributarios obtenidos por la delimitación automática, mientras que muchas corrientes que no fueron generadas en el proceso corresponden a barrancas cuyo tipo de escurrimientos son de carácter intermitente o efímero.

B. Orden de corrientes

El primer paso en el análisis de cuencas hidrológicas es la definición del orden de corrientes, introducido por Horton, y modificado por Strahler.

La utilidad del sistema de orden de corrientes es que, en promedio, si una muestra de sistemas de cauces se analiza, el número de orden es directamente proporcional al tamaño de la cuenca de drenaje, a las dimensiones de los cauces y al caudal en ese lugar del sistema. Como el número de orden es adimensional, dos sistemas de drenaje que difieren gradualmente en cada línea

se pueden comparar con respecto a puntos correspondientes en su geometría, a través del uso de orden de corrientes.

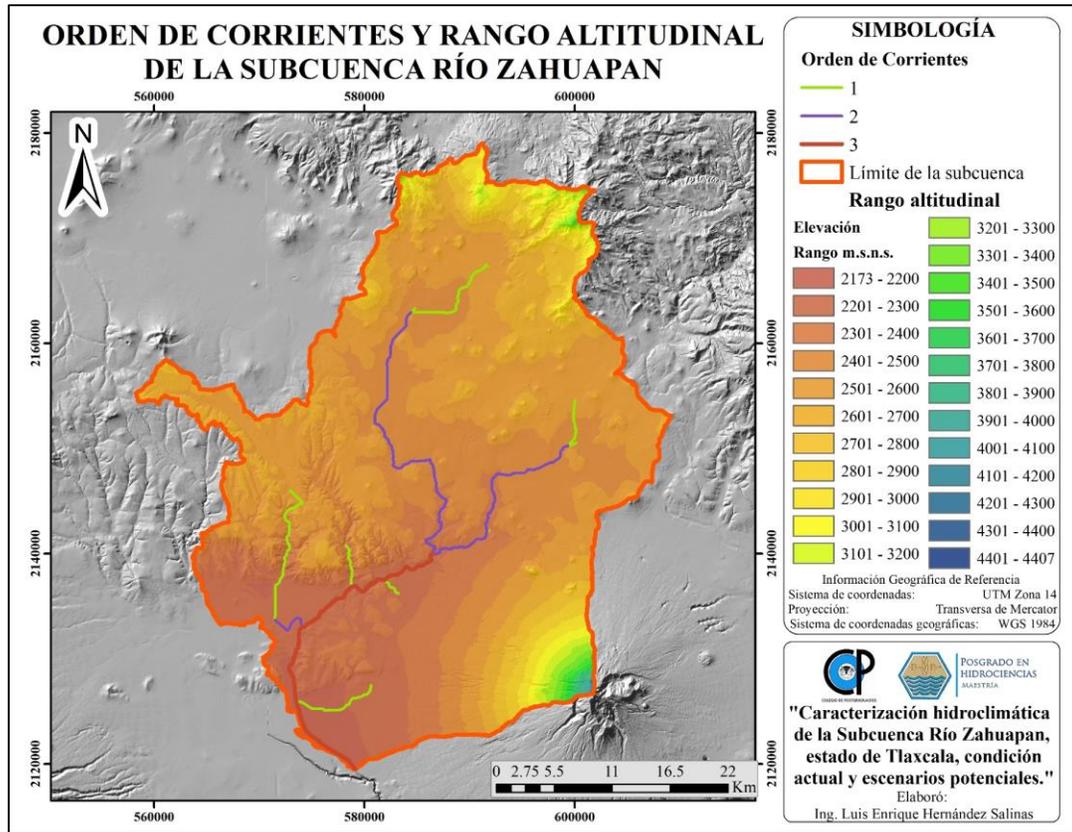


Figura 4.19.- Ordenes de corrientes presentes en la cuenca.

La cuenca bajo estudio posee un orden de corrientes 3, el siguiente cuadro muestra la cantidad de corrientes por cada orden generado por la delimitación automatizada.

Cuadro 4.13.- Ordenes de corrientes presentes en la cuenca.

Número de orden	Número de corrientes
1	9
2	3
3	1

C. Relación de bifurcación

El número de segmentos de un orden dado u , será menor que el del siguiente orden inferior, $u-1$ y más que el del orden superior, $u+1$. Las relaciones del número de segmentos de un orden dado con el que le sigue N_{u+1} se denominan relaciones de bifurcación Rb_u y se expresan como:

$$Rb_u = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (4.5)$$

Donde:

Rb_u = Relación de bifurcación de orden u (adimensional)

N_u = Número de cauces de orden u (adimensional)

El siguiente cuadro muestra las relaciones de bifurcación presentes en la cuenca.

Cuadro 4.14.- Relaciones de bifurcación entre los órdenes de corriente.

Relaciones de bifurcación		
Rb1	9/3	3.00
Rb2	3/1	3.00

D. Relación de bifurcación promedio

El cálculo de la relación de bifurcación promedio Rb , para un sistema de cauces dado, se puede estimar determinando la pendiente b , de la regresión lineal entre el número de cauces de orden u , en las ordenadas, versus el número de orden u en las abscisas. Por ejemplo, en la ecuación de regresión lineal:

$$\text{Log } N_u = a - b_u \quad (4.6)$$

El coeficiente de regresión b es idéntico al logaritmo de relación de bifurcación promedio Rb , por lo que la $Rb = \text{Log}-1 b$. El siguiente cuadro muestra el cálculo de la relación de bifurcación promedio.

Cuadro 4.15.- Cálculo de la relación de bifurcación promedio para la cuenca.

Número de orden	Número de corrientes	Rb _u	Log Nu	Nu = Ru ^{k-u}
1	9	3.00	0.95	81.00
2	3	3.00	0.48	27.00
3	1			
Sumatoria	13			

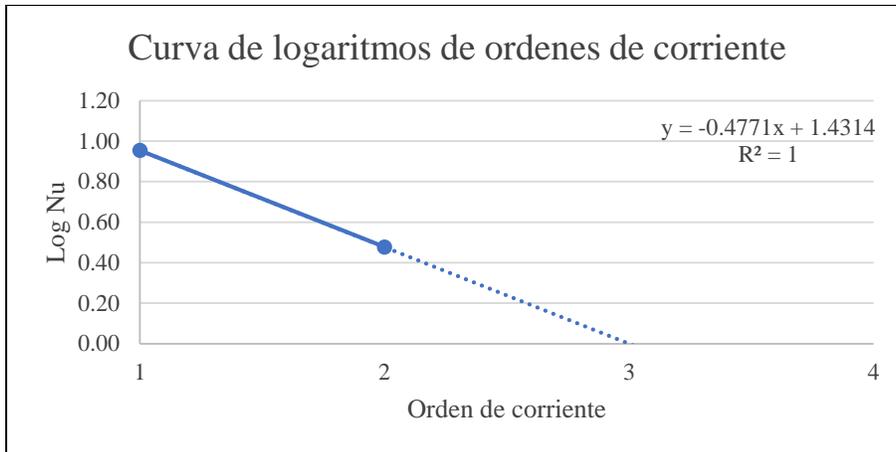


Figura 4.20.- Curva de logaritmos de relaciones de bifurcación.

De lo anterior obtenemos los siguientes coeficientes:

$$b = .477$$

$$a = 1.4314$$

$$\text{Log Nu} = -0.477x + 1.4314$$

Por lo tanto, la Rb promedio es:

$$Rb = \text{Log}^{-1}b = \text{Log}^{-1} 0.477$$

$$Rb = 2.99$$

E. Longitud media de los cauces

La longitud media L_u , de los segmentos de cauces de orden u es una propiedad dimensional que revela el tamaño característico de los componentes del sistema de drenaje y las superficies de la cuenca que contribuyen a un escurrimiento. Para obtener la longitud media de los cauces de orden u , se divide la longitud total entre el número de segmentos N_u de ese orden.

$$\bar{L}_u = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} L_{ui}}{N_u} \quad (4.7)$$

Donde:

\bar{L}_u = Longitud media de los cauces de orden u (km)

L_{ui} = Longitud del cauce i de orden u ($i = 1, 2, 3, \dots, N_u$) (km)

N_u = número de cauces (adimensional)

Cuadro 4.16.- Longitud de cauces por su orden de corriente.

No. de orden	No. de cauces	Longitud total (km)	Longitud media (km)
1	9	34.35	3.82
2	3	59.66	19.89
3	1	49.83	49.83
Total	13	143.84	

F. Densidad de drenaje

La longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida entre su área total de drenaje, define la densidad de drenaje o longitud de cauces por unidad de área.

$$Dd = \frac{L_c}{A_c} \quad (4.8)$$

Donde:

$Dd =$ Densidad de drenaje (km/km^2)

$Lc =$ Longitud total de corrientes (km)

$Ac =$ Área de drenaje (km^2)

Para la subcuenca:

$$Dd = \frac{143.84}{1,646.62} = 0.087 \text{ km}/\text{km}^2$$

G. Densidad de corrientes

Esta característica es un indicador de la eficiencia de drenaje de una cuenca, pero debe manejarse con criterio, debido a que puede ocurrir que se tengan dos cuencas diferentes con la misma densidad de corrientes y estar drenadas en diferente forma, dependiendo de la longitud y disposición de corrientes. La densidad de corrientes se representa como la relación existente entre el número de corrientes y el área drenada total:

$$Dc = \frac{Nc}{Ac} \quad (4.9)$$

Donde:

$Dc =$ Densidad de corrientes (cauces/ km^2 o ha)

$Nc =$ Número de corrientes o cauces (adimensional)

$Ac =$ Área de la cuenca (km^2)

Para determinar el número de corrientes sólo se consideran las corrientes perennes e intermitentes. La corriente principal se cuenta como una desde su nacimiento hasta su desembocadura. Después se tendrán todos los tributarios de orden inferior de su nacimiento hasta su unión con la corriente principal y así sucesivamente hasta llegar a los tributarios de orden uno. Determinando que los cauces de nuestra cuenca son todos ellos perennes, entonces:

$$Dc = \frac{10}{1,646.62} = 0.006 \text{ cauces}/\text{km}^2$$

H. Longitud media de flujo de superficie

Es la longitud total del flujo que se concentra en una sola corriente, se mide desde su inicio hasta su salida de la cuenca. La longitud del flujo sobre la tierra L_g es aproximadamente igual a la mitad del recíproco de la densidad de drenaje.

$$L_g = \frac{1}{2D_d} \quad (4.10)$$

Donde:

L_g = Longitud media de flujo de superficie (km)

D_d = Densidad de Drenaje (km/km^2)

Entonces:

$$L_g = \frac{1}{2(0.087)} = 5.74 \text{ km}$$

4.4.4. Parámetros de relieve

A. Pendiente media de la cuenca

Existen varios métodos o criterios que permiten evaluar la pendiente de una cuenca, su elección depende del propósito del estudio y de los recursos disponibles, los más comunes son los de Alvord, de Horton y de Nash.

a) Método de Alvord

Este criterio se apoya en la definición de las pendientes medias del terreno entre fajas de terreno limitadas por dos curvas de nivel, posteriormente se calcula un promedio ponderado de acuerdo con el área que cubren los pares de curvas de nivel con respecto al área de la cuenca. La longitud media de dos curvas a nivel se puede obtener de la semisuma de la longitud de las dos curvas a nivel intermedias consecutivas; o bien midiendo la longitud de la curva a nivel entre las dos curvas intermedias que definen una faja i .

Finalmente, la ecuación queda definida de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{D}{A_c} L \quad (4.11)$$

Donde:

Sc = Pendiente de la cuenca (adimensional)

D = Equidistancia vertical entre curvas de nivel (km)

Ac = Área de la cuenca (km²)

L = Longitud total de las curvas a nivel dentro de la cuenca (km)

Para la subcuenca:

$$Sc = \frac{.1 \text{ km}}{1,646.62 \text{ km}^2} \cdot 1,788.67 \text{ km} = 0.108 = 10.86\%$$

b) Método de Horton

Consiste en la creación de una malla sobre la subcuenca en la que se contabilizan las intersecciones de las curvas de nivel con las líneas en sentido x y sentido y de la cuadrícula.

Cuadro 4.17.- Intersecciones contabilizadas en la malla interna de la subcuenca.

Líneas X e Y	Longitud de las líneas dentro de la subcuenca (km)		Número de intersecciones	
	i	Lx _i	Ly _i	Nx _i
1	11.05	3.07	6	2
2	19.92	3.36	7	1
3	21.67	2.73	5	1
4	28.34	41.11	3	9
5	32.01	51.31	4	10
6	32.86	50.82	2	7
7	30.74	55.92	2	11
8	32.11	55.89	3	12
9	46.51	48.78	5	6
10	39.35	43.51	11	3
11	38.11	36.34	18	3
12	34.26	19.95	7	7
13	28.39	3.42	3	4
14	15.28	-	2	-
Sumas	410.6	416.21	78	76

Con la información del Cuadro 4.17 se emplea la siguiente fórmula:

$$S = \frac{N \cdot D}{\Sigma L}$$

Donde:

S = Pendiente en el sentido horizontal o vertical de la cuadrícula

N = Número total de intersecciones en el sentido horizontal o vertical de la cuadrícula

D = Equidistancia vertical entre curvas de nivel (km)

ΣL = Sumatoria de las longitudes de las líneas dentro de la subcuenca en el sentido horizontal o vertical de la cuadrícula (km)

Obteniéndose como resultados de la pendiente en ambos sentidos de la cuadrícula:

$$S_x = 0.0190 \quad \text{y} \quad S_y = 0.0183$$

Y finalmente, la pendiente media de la cuenca (S_c) es el promedio de las dos pendientes anteriores:

$$S_c = 0.0186$$

Por otra parte, mediante el uso del *software* ArcMap se obtuvo una pendiente media de 8.81%, lo que nos hace analizar que los valores obtenidos por procesamiento automático y por el método de Alvord se encuentran próximos, no es así con el resultado del método de Horton, lo cual podemos atribuir a la forma y características de la distribución de las curvas a nivel dentro de la subcuenca.

B. Elevación media de la cuenca

a) Método de intersecciones

Para este método se estiman las elevaciones de cada una de las intersecciones de la cuadrícula que caen dentro del parteaguas mediante interpolación de las curvas de nivel para cada vértice y se cuentan las intersecciones con dicha elevación estimada dentro de la cuenca. La elevación promedio de la cuenca es la media de las elevaciones de las intersecciones.

Mediante el procesamiento de los archivos vectoriales referentes a las curvas a nivel, así como la generación de una malla que cubre la superficie poligonal de la cuenca, fue posible obtener de manera precisa el número y valor de altitud de las intersecciones entre ambas capas, el Cuadro 4.18 presenta un resumen de las intersecciones. La ecuación empleada es la siguiente:

$$Em = \frac{\sum_{i=1}^{Nelev} Elev_i}{Nelev} \quad (4.12)$$

Donde:

Em = Elevación media de la cuenca (msnm)

Elev_i = Elevación de las intersecciones i (msnm)

Nelev = Número de intersecciones de la cuadrícula en la cuenca.

Cuadro 4.18.- Intersecciones de la malla interna de la cuenca con curvas a nivel.

Cota de altitud	No. De intersecciones	Subtotales
2200	5	11,000
2300	12	27,600
2400	13	31,200
2500	19	47,500
2600	21	54,600
2700	17	45,900
2800	13	36,400
2900	12	34,800
3000	10	30,000
3100	9	27,900
3200	6	19,200
3300	5	16,500
3400	2	6,800
3500	1	3,500
3600	2	7,200
3700	2	7,400
3800	2	7,600
3900	2	7,800
4000	1	4,000
Total	154	426,900

Entonces, la elevación media de la cuenca es de 2772 m.s.n.m.

b) Método de la curva hipsométrica

Desde el reporte topográfico que se obtiene con la delimitación automática, para la cuenca se tienen los siguientes valores:

Cuadro 4.19.- Superficie de la cuenca acotada por las curvas a nivel presentes.

Límite inferior (msnm)	Límite superior (msnm)	% Área debajo del límite superior
-	2173	0
2173	2200	2.57
2200	2300	14.64
2300	2400	24.15
2400	2500	45.64
2500	2600	75.74
2600	2700	87.10
2700	2800	91.26
2800	2900	93.94
2900	3000	96.09
3000	3100	97.56
3100	3200	98.52
3200	3300	99.09
3300	3400	99.41
3400	3500	99.59
3500	3600	99.68
3600	3700	99.77
3700	3800	99.84
3800	3900	99.91
3900	4000	99.95
4000	4100	99.98
4100	4200	99.99
4200	4300	99.99
4300	4400	99.99
4400	4407	100.00

Con lo cual es posible generar la siguiente curva hipsométrica:

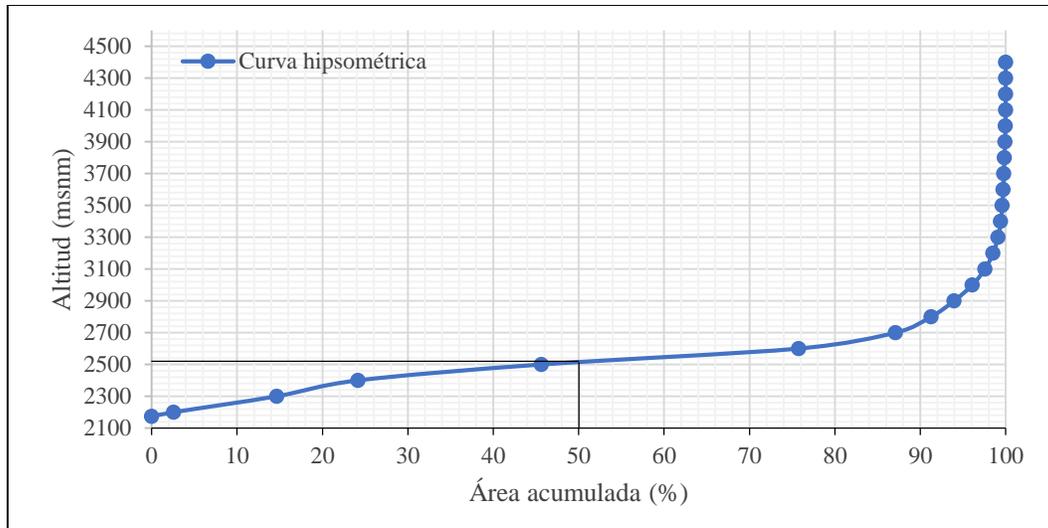


Figura 4.21.- Curva hipsométrica desarrollada para la cuenca.

Por lo anterior:

Elevación media de la cuenca = 2520 m.s.n.m.

Por su parte, mediante el análisis de la imagen *raster* del modelo digital de elevación se observó una altitud media de la cuenca de 2526 msnm.

C. Pendiente del cauce principal

a) Método de la relación longitud – elevación

El perfil del cauce se puede representar llevando en una gráfica los valores de las distancias horizontales medidas sobre el cauce en relación a sus elevaciones respectivas, como las intersecciones con las curvas a nivel. En general, la pendiente de un tramo de cauce se considera como el desnivel entre los extremos del tramo, dividido entre la longitud horizontal de dicho tramo. Vale la pena mencionar que, aunque la altura máxima de la cuenca sea de 4407 m.s.n.m. la altura máxima del inicio del cauce principal generado es de 2554 m.s.n.m.

$$S = \frac{H}{L} \quad (7.13)$$

Donde:

S = Pendiente del cauce (%)

H = Desnivel (km)

L = Longitud del cauce (km)

Entonces considerando las características generales del cauce principal:

$$S = \frac{(2.524 - 2.173)}{78.29} = 0.448\%$$

Mientras que mediante el análisis los segmentos del cauce principal se puede construir la siguiente tabla:

Cuadro 4.20.- Rangos altitudinales y pendiente de segmentos del cauce principal.

Límite Inferior	Límite Superior	Longitud (km)	Pendiente
2500	2554	2.90	1.86%
2400	2500	30.63	0.33%
2300	2400	8.17	1.22%
2200	2300	21.92	0.46%
2173	2200	14.67	0.18%

Del cual considerando las pendientes específicas de cada segmento se obtiene una pendiente promedio de 1.13%. Por su parte, del análisis de las pendientes generadas mediante el procesamiento del modelo de elevación digital es posible extraer las celdas correspondientes al cauce principal y con ello observar que indican una pendiente media del cauce de 2.21%.

4.5. Comportamiento histórico de variables climáticas y bajo escenarios de cambio climático para diversas estaciones climatológicas

En esta sección se realizó un análisis del comportamiento de las variables temperatura media mensual y precipitación mensual acumulada bajo escenarios de cambio climático y su comparativa contra las medias históricas para 20 estaciones meteorológicas dentro la subcuenca y en una zona de influencia de 10 km en torno al parteaguas. A continuación, se describe de manera general lo observado bajo escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099), mientras que en el Anexo A se pueden observar a detalle los comportamientos de las variables en cada estación, la intención de este apartado es generar información específica acerca del comportamiento a esperarse en lugares más puntuales que sobre el comportamiento de toda la subcuenca, con el propósito de ser disponible a quienes consulten este trabajo y cuyo interés

sea una localidad en particular en la proximidad de las estaciones meteorológicas evaluadas y que no puedan acceder al acervo de mapas y recursos digitales que se derivan de este trabajo o que se encuentran en los acervos institucionales.

La información de escenarios de cambio climático fue descargada desde el portal de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quienes ponen a disposición pública los recursos generados como parte de la quinta comunicación nacional de México para la convención marco de Naciones Unidas para el cambio climático. Es adecuado recuperar el hecho que en el quinto reporte de evaluación del IPCC sobre cambio climático (5AR) se presentaron nuevos escenarios regionales, siguiendo una metodología diferente a la empleada en su cuarto reporte de evaluación (4AR). Para generar el reporte de la quinta comunicación nacional, se coordinaron los esfuerzos del CCA, del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), así como del Servicio Meteorológico Nacional. A partir del reporte anterior, se estructuraron ejemplos de nuevos escenarios de cambio climático para México utilizando modelos de circulación general propuestos por el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés).

Los tres modelos considerados para este trabajo corresponden a las nuevas salidas de aquellos seleccionados para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático: MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute - Alemania), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Estados Unidos), HADGEM2-ES (Met Office Hadley – Reino Unido).

Cuadro 4.21.- Estaciones meteorológicas consideradas para el análisis climático de la subcuenca río Zahuapan.

Clave	Nombre	Estatus	Municipio	Periodo de registros		Años
29002	Apizaco	Operando	Apizaco	1928	2013	85
29032	Tlaxco	Operando	Tlaxco	1944	2013	69
21078	San Martín Texmelucan	Operando	San Martín Texmelucan	1945	2018	73
29003	San José Atlanga	Operando	Atlangatepec	1961	2013	52
29010	Hueyotlipan	Operando	Hueyotlipan	1962	2017	55
29012	La Gloria (CFE)	Suspendida	Tlaxco	1962	1996	34
29030	Tlaxcala de Xicoténcatl (DGE)	Operando	Tlaxcala	1962	2013	51
29004	Cuamantzingo	Operando	Muñoz de Domingo Arenas	1964	2017	53
29034	Zoquiapan	Operando	Calpulalpan	1966	2015	49
29024	Sanctorum	Suspendida	Sanctorum de Lázaro Cárdenas	1969	2006	37
29040	Ixtacuixtla	Operando	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	1975	2013	38
29041	Tepetitla	Operando	Tepetitla de Lardizábal	1975	2013	38
29047	Españita	Operando	Españita	1977	2013	36
21148	San Miguel Canoa	Operando	Puebla	1978	2018	40
29051	Toluca de Guadalupe	Operando	Terrenate	1980	2013	33
29052	El Rosario	Operando	Tlaxco	1981	2013	32
29053	Terrenate	Suspendida	Terrenate	1981	2011	30
29165	El Epazote	Suspendida	Emiliano Zapata	1985	2013	28
29042	Amaxac de Guerrero	Operando	Amaxac de Guerrero	1988	2013	25
29050	Teolocholco	Operando	Teolocholco	1993	2013	20

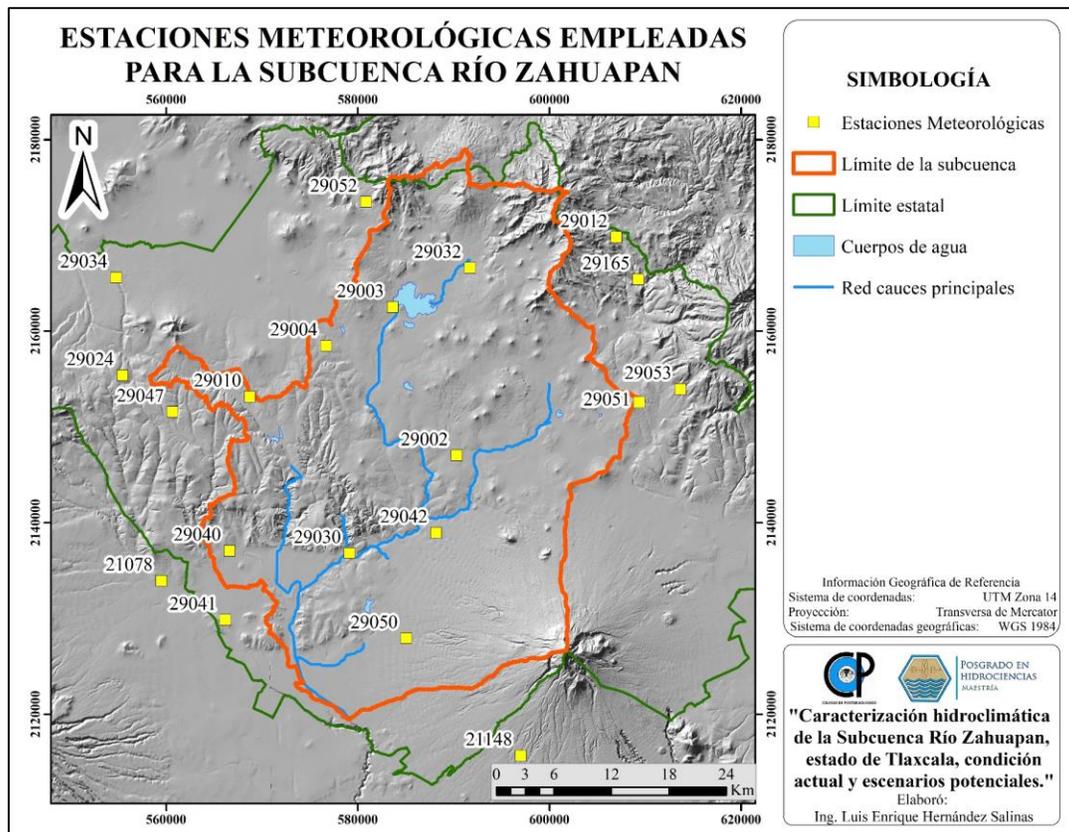


Figura 4.22.- Distribución espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

El procedimiento consistió en la descarga de los archivos mensuales de temperatura media mensual y precipitación mensual acumulada para cada uno de los escenarios considerados, dicha información se encuentra en formato *raster* tipo TIFF en las bases de datos abiertas del UNIATMOS, posterior a definir las estaciones meteorológicas sobre las cuales se realizaría el análisis se generó un archivo shapefile de puntos que las contuviera, mediante la herramienta *Extract Values to Points* de ArcMap se extrajeron los valores puntuales para cada sitio siendo agregados a la tabla de atributos que finalmente fue exportada para continuar con los procesos en Excel.

Para la subcuenca del río Zahuapan se encontraron diversos comportamientos en cada una de las estaciones analizadas, las cuales van desde un incremento de precipitaciones en los meses más húmedos del año, junio-agosto, hasta un incremento en la severidad de la canícula, lo cual demuestra que los impactos del cambio climático no obedecen una regla general que pueda ser tomada como un absoluto, sino más bien esta es específica a cada sitio inclusive dentro de una región relativamente pequeña como lo es esta subcuenca. En cuanto a temperatura media podemos

considerar un incremento generalizado en todos los meses y que se acentúa hacia el horizonte lejano (2075-2099), el detalle de cada estación se encuentra en el Anexo A de este trabajo.

Una revisión puntual del comportamiento en cada estación permite establecer estrategias locales de mitigación, pero sobre todo de adaptación ante el cambio climático los cuales pueden ser, en lo agrícola, la adopción de variedades de cultivos que se ajusten a las nuevas condiciones de temperatura y a la longitud del periodo de lluvias sin que comprometa su buen desarrollo o genere complicaciones sobre su cosecha, o la implementación de técnicas de agricultura de conservación que reduzcan la pérdida de humedad del suelo acentuada por el incremento en la temperatura del aire. Esto considerando sobre todo que la agricultura de secano se vuelve el sector más vulnerable ante los efectos adversos del calentamiento global dada su dependencia a los regímenes hídricos susceptibles de cambio.

De igual manera es posible establecer estrategias como planes de desarrollo de obras de conservación del suelo y agua en el largo plazo que permitan obtener un mejor aprovechamiento de los escurrimientos superficiales, así como puedan evitar afectaciones por incremento en la cantidad e intensidad de avenidas extremas dadas las nuevas condiciones en las precipitaciones.

En el Cuadro 4.22 se observa el comportamiento general de las variables analizadas bajo cada iteración de MCG, RCP y horizonte temporal, considerando un promedio de todas las estaciones observadas contra el valor histórico. Las diferencias entre modelos climatológicos pueden ser considerables y debido a esto es que deben de considerarse un conjunto de ellos para poder identificar las posibles tendencias de cambio. A grandes rasgos el modelo MPI anticipa un incremento en las precipitaciones de manera generalizada en la cuenca, mientras que el modelo HADGEM presenta anomalías tanto positivas como negativas y finalmente el modelo GFDL predice una disminución predominante en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Para el caso de temperatura los incrementos entre los distintos modelos son bastante similares.

Cuadro 4.22.- Tendencia de cambio promedio para cada escenario en la subcuenca.

Modelo	RCP - Horizonte	Precipitación media anual promedio (mm)	Anomalía (%)	Temperatura media anual promedio (°C)	Anomalía (°C)
	Media histórica	692.45	-	14.34	-
GFDL	RCP 2.6 (1915-2039)	731.20	+ 5.60	16.02	+ 1.68
	RCP 2.6 (1975-2099)	754.75	+ 9.00	16.87	+ 2.53
	RCP 4.5 (1915-2039)	614.85	- 11.21	15.90	+ 1.56
	RCP 4.5 (1975-2099)	623.60	- 9.94	17.74	+ 3.40
	RCP 8.5 (1915-2039)	620.45	- 10.40	15.88	+ 1.54
	RCP 8.5 (1975-2099)	582.50	- 15.88	19.61	+ 5.27
HADHEM	RCP 2.6 (1915-2039)	638.06	- 7.85	15.83	+ 1.49
	RCP 2.6 (1975-2099)	744.05	+ 7.45	16.27	+ 1.93
	RCP 4.5 (1915-2039)	655.65	- 5.31	15.60	+ 1.27
	RCP 4.5 (1975-2099)	704.35	+ 1.72	17.56	+ 3.22
	RCP 6.0 (1915-2039)	712.70	+ 2.93	15.71	+ 1.37
	RCP 6.0 (1975-2099)	816.85	+ 17.97	18.05	+ 3.71
	RCP 8.5 (1915-2039)	735.65	+ 6.24	15.71	+ 1.37
	RCP 8.5 (1975-2099)	713.35	+ 3.02	19.63	+ 5.29
MPI	RCP 2.6 (1915-2039)	759.00	+ 9.61	15.75	+ 1.42
	RCP 2.6 (1975-2099)	736.95	+ 6.43	15.81	+ 1.47
	RCP 4.5 (1915-2039)	763.90	+ 10.32	15.63	+ 1.30
	RCP 4.5 (1975-2099)	728.85	+ 5.26	17.00	+ 2.66
	RCP 8.5 (1915-2039)	739.95	+ 6.86	15.82	+ 1.49
	RCP 8.5 (1975-2099)	734.80	+ 6.12	18.92	+ 4.58

Sin embargo, como ha sido mencionado es difícil generalizar un comportamiento y basar decisiones en dicha síntesis de información, por lo que en las Figuras 4.23 – 4.28 es posible hacer un análisis en paso temporal mensual donde se observa que para la cuenca una anomalía en el valor medio anual relativamente “menor” no necesariamente significa pocos cambios, pues éstos pueden ser significativos en los meses, por ejemplo, al concentrar la precipitación total en unos cuantos meses y reducir la precipitación en otros, pues como fue dicho es posible identificar un comportamiento general para una zona dada, pero el grado de detalle del estudio es de suma importancia para poder plantear las mejores estrategias a nivel local.

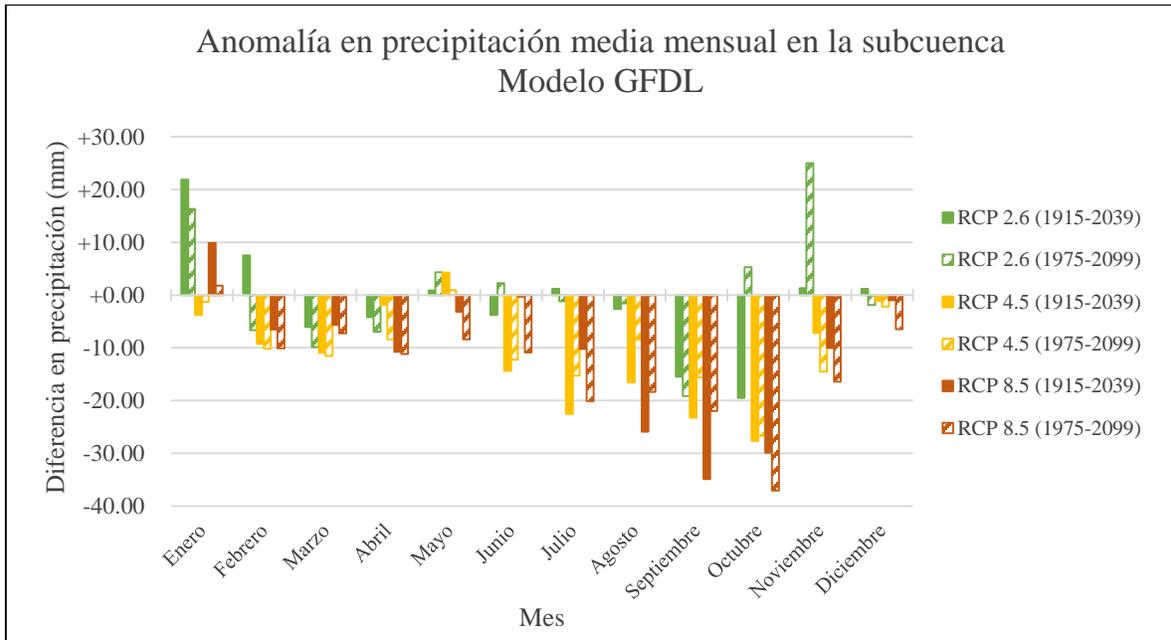


Figura 4.23-. Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG GFDL_CM3 en la subcuenca.

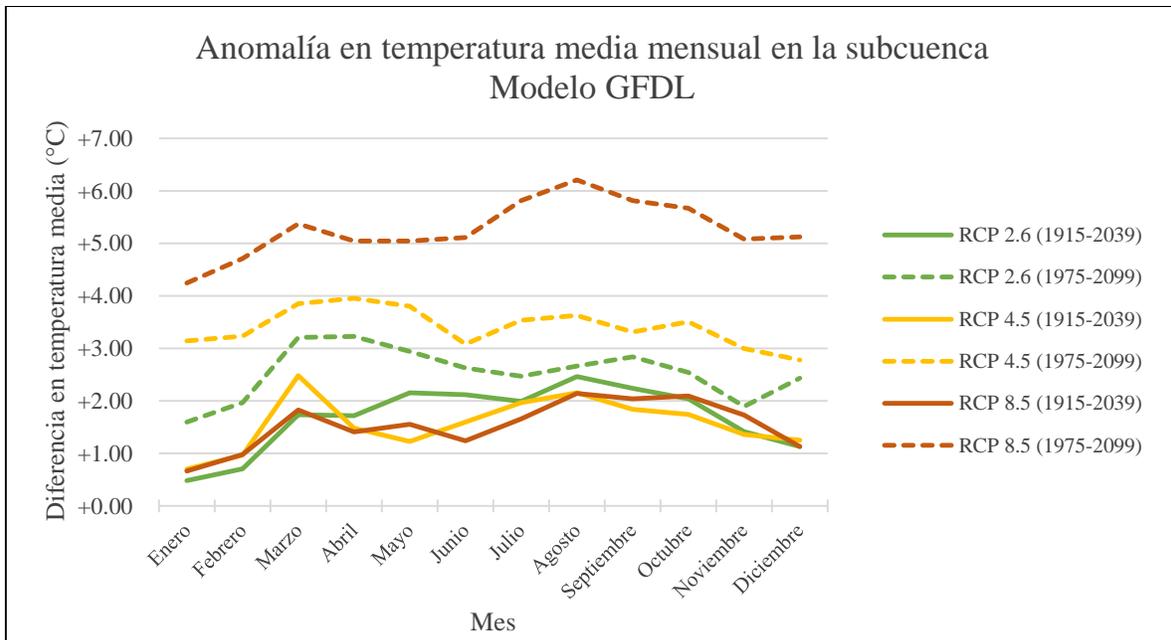


Figura 4.24.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG GFDL_CM3 en la subcuenca.

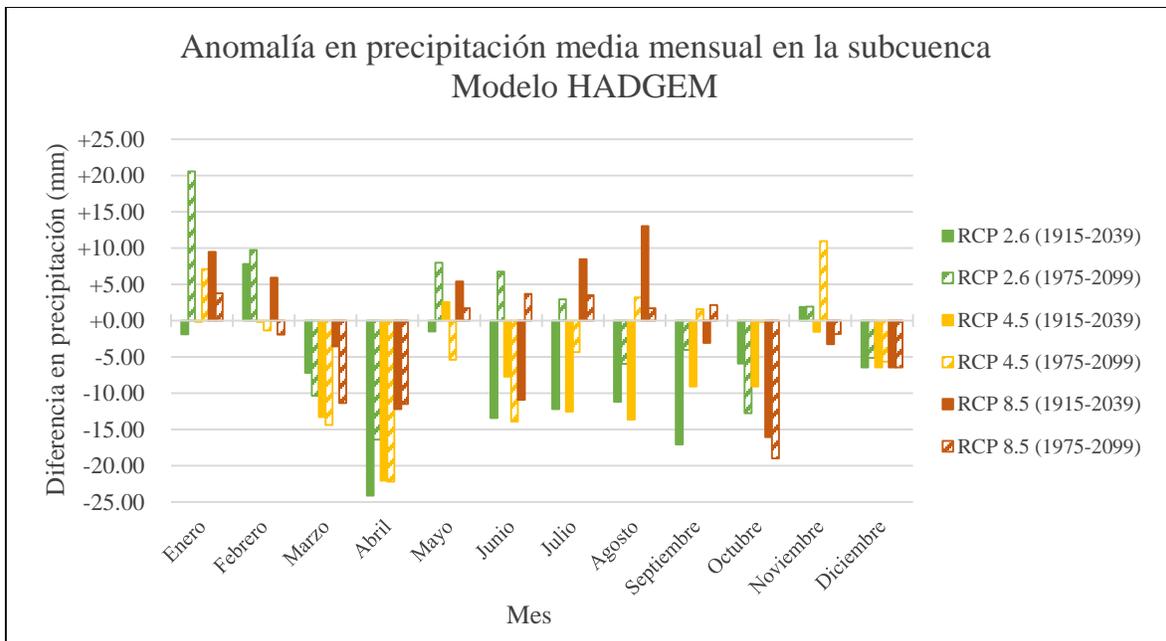


Figura 4.25.- Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG HADGEM2_ES en la subcuenca.

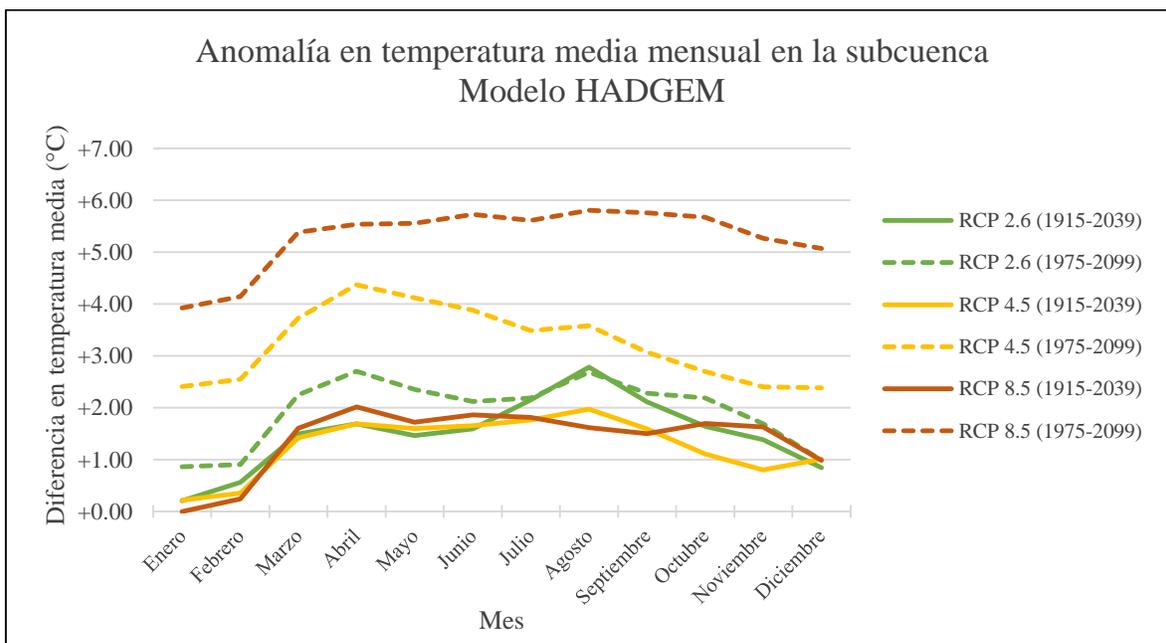


Figura 4.26.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG HADGEM2_ES en la subcuenca.

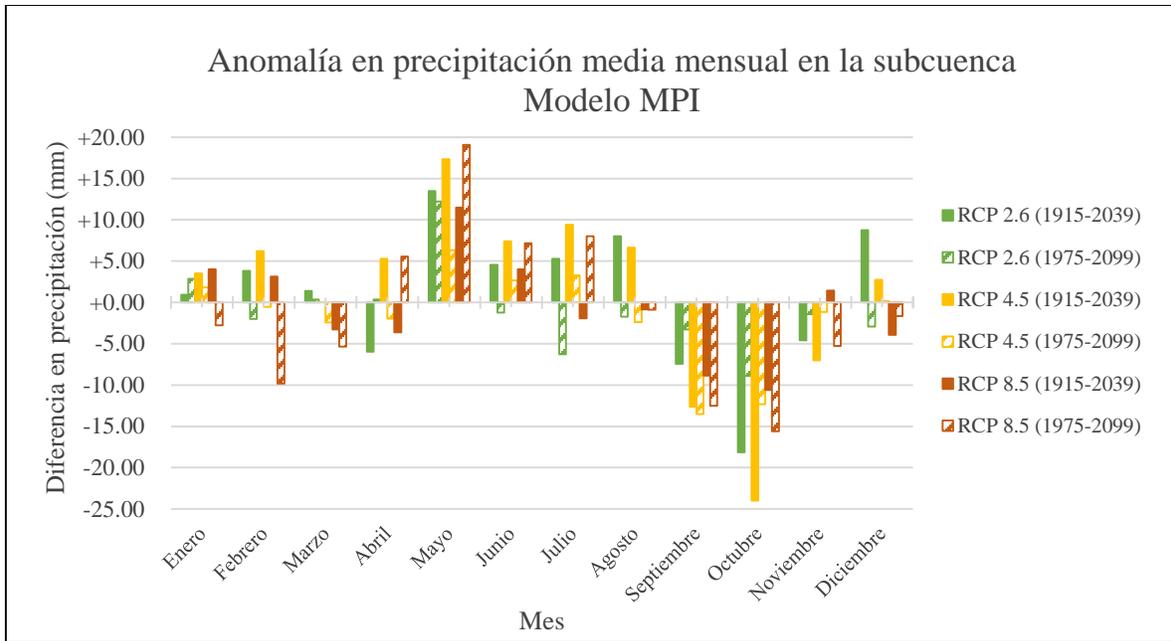


Figura 4.27.- Anomalía esperada en PP media mensual bajo MCG MPI_ESM_LR en la subcuenca.

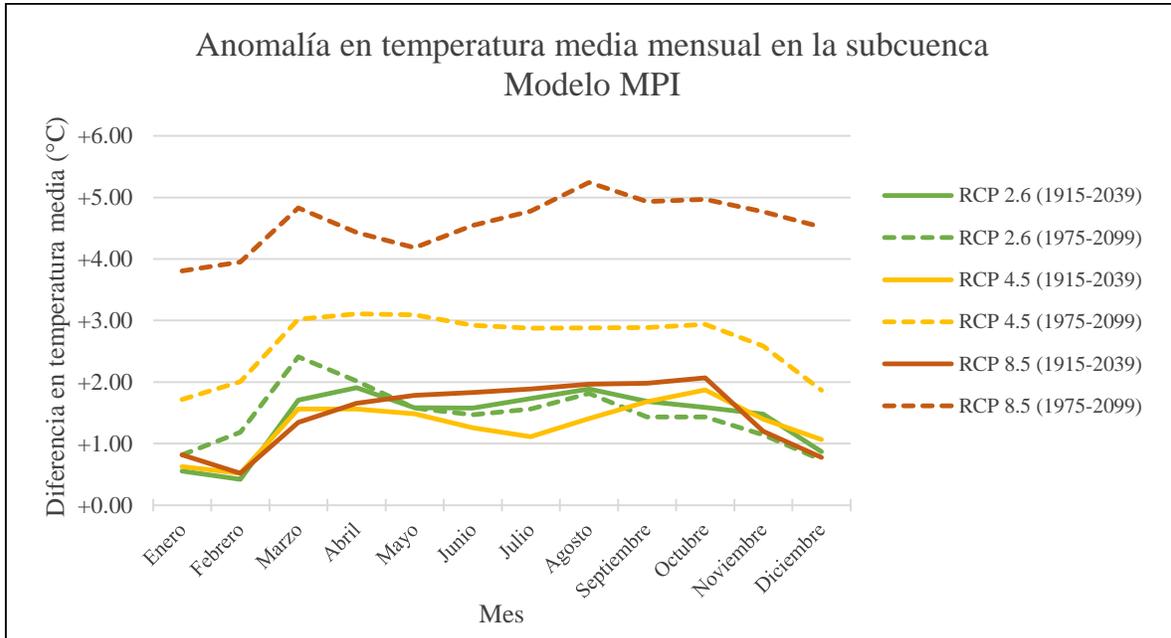


Figura 4.28.- Anomalía esperada en Temperatura media mensual bajo MCG MPI_ESM_LR en la subcuenca.

4.6. Balance hidrológico de Thornthwaite y Mather

De acuerdo con Santillán *et al.* (2013), aun cuando todos los balances hídricos parten del principio de conservación de la materia, la forma en que son estimados parte de diversos métodos y formas. Pudiendo ser a través de métodos estocásticos o estadísticos, funciones determinísticas, métodos numéricos y teóricos, así como aproximaciones semi-empíricas. El balance propuesto por Thornthwaite y Mather (1957) se basa en un método empírico al cual denominaron método directo. Este tipo de balances suelen nombrarse Balances Hídricos Climáticos (BHC), por el hecho de basarse en variables climatológicas para su estimación. Utiliza la capacidad de almacenamiento de agua del suelo como una referencia de la reserva de agua que puede retenerse en un cierto tipo de suelo y con una cierta cubierta vegetal. Además, emplea valores de precipitación y temperatura de un cierto periodo de años como datos de entrada, pues en su desarrollo se debe calcular la evapotranspiración potencial.

Debido a que la aplicación del método es mediante el uso de ecuaciones y reglas generales con base en valores específicos para un sitio, el empleo de esta en áreas heterogéneas puede obedecer a distintas aproximaciones de la distribución espacial de las variables, por ejemplo, Martín *et al.* (2015) proponen el análisis ponderado mediante polígonos de Thiessen a partir de información de las estaciones meteorológicas presentes en el área. De igual manera debe prestarse atención a la libertad del método en cuanto al cálculo de la evapotranspiración potencial pues estos mismos autores emplean las fórmulas descritas en los métodos de Thornthwaite, Blaney–Criddle y Hargreaves-Samani, quienes mediante comparativa con los resultados obtenidos con el método directo de registros hidrométricos ‘MDRH’ establecido en la NOM-011-CNA-2000 (existente en aquel entonces, siendo la publicación de 2015 la versión más actualizada de la norma), concluyeron que este método puede ser utilizado en sitios donde no puedan obtenerse mediciones directas para recabar información base para el establecimiento de acciones primarias de manejo.

Similar al anterior trabajo es el de Rodríguez *et al.* (2019) quienes emplearon en la estimación de la evapotranspiración potencial los métodos de Thornthwaite, Blaney–Criddle, Hargreaves y Hamon, así como un promedio de los cuatro métodos. Este estudio en particular al igual que el de del Toro-Guerrero *et al.* (2014) consideran que el método del BHC de Thornthwaite-Mather puede emplearse también para evaluar la infiltración y recarga potencial al acuífero en zonas donde los escurrimientos superficiales son mínimos, siendo desarrollados los

estudios para la península de Yucatán y en la cuenca del Mojar en Baja California, respectivamente.

El método ha sido ampliamente comparado contra mediciones directas de escurrimientos presentando resultados aceptables siendo sus principales debilidades la relativa simplificación de procesos dentro de una cuenca y la suposición de que la precipitación se manifieste de forma regular en el tiempo y espacio, para lo cual una propuesta de calibración del modelo es el considerar variaciones en la proporción del escurrimiento mensual generado por los excesos de humedad, es decir asumir valores diferentes al 50% propuesto en el método original (Calvo, 1986).

Ya que el método original se basa en la premisa de que aquella humedad excedente se volverá exclusivamente escurrimiento, algunos autores han considerado que es posible realizar ciertas consideraciones previas a la precipitación total antes de convertirse en precipitación efectiva y de esta manera evaluar el potencial de recarga de agua al subsuelo. De esta manera el trabajo de Scozzafava y Tallini (2001) plantearon realizar el cálculo de escurrimientos mediante el método del número de curva desarrollado por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos para reducir de manera inmediata la fracción de la precipitación que escurriría por evento y posteriormente realizar los procesos del cálculo del balance hídrico con la precipitación “restante”, siendo el exceso la cantidad de agua a percolarse en el mes en cuestión y en los sucesivos.

Algo similar es posible encontrar en el reporte técnico de 2010 “SWB—A *Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge*” realizado por el Departamento Geológico de Estados Unidos (USGS), en el cual se desarrolló un código libre de programación capaz de ser empleado en el lenguaje Fortran 95 para la estimación de la recarga potencial de acuíferos. Sin embargo, la principal dificultad de adoptar estas metodologías es el requisito de valores diarios de las variables climatológicas puesto que el método del número de curva está diseñado para el cálculo de escurrimientos por evento, aunque Scozzafava y Tallini abordan el cálculo mediante un re-escalamiento de la precipitación mensual histórica hacia valores diarios mediante métodos estadísticos basados en la cantidad de días con eventos de lluvia. Este paso podría solventar el desarrollo del método en condiciones históricas o actuales, pero entra en conflicto con el empleo de escenarios de cambio climático donde uno de los supuestos más importantes del fenómeno del calentamiento global, y que en la actualidad es apreciable cada vez

más, es la alteración de los regímenes de eventos de precipitación siendo variables en su frecuencia y duración. Por lo cual se requerirían procesamientos de análisis de anomalías de probabilidad de lluvia e intensidad de las mismas desde modelos generales de la atmosfera para los cuales no existen re-escalamientos al territorio nacional y cuyo desarrollo requieren de procesos más complejos como los empleados en la obtención de información del Proyecto CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*).

Finalmente, ante las consideraciones previas, se propone seguir el método original, el cual ha demostrado arrojar resultados aceptables al ser aplicado en distintas zonas del país como lo es los trabajos de Ruiz *et al.* (2012), Santillán-Gutiérrez *et al.* (2013) y Santillán-Fernández *et al.* (2020).

Uno de los factores determinantes en el método es el valor de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, el cual debe ser calculado con base en la interacción entre los valores de la capacidad de agua disponible (*available water capacity*) del suelo y los de profundidad radicular según la textura del suelo y el tipo de vegetación aportados por las tablas de balance de Dunne y Leopold (1978). La capacidad de agua disponible del suelo se determina con la textura representativa y la profundidad promedio del suelo, este método se basa en el uso de tablas, donde se establece que a un suelo de textura y profundidad conocidas corresponde una lámina de agua específica. Finalmente, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo queda definido por la siguiente ecuación:

$$CAAS = CAD * PR \quad (4.15)$$

Donde:

CAAS: es la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

CAD: es la capacidad de agua disponible (mm)

PR: es la profundidad radicular de la vegetación presente (m)

El método supone que el agua del suelo se va perdiendo conforme pasa el tiempo hasta agotar su reserva y así cubrir las necesidades hídricas del sistema. Este método consiste en estimar mes con mes los siguientes parámetros, definidos en del Toro-Guerrero (2014) como:

- Precipitación (PP): es el componente de mayor importancia, al ser el que aporta directamente el recurso hacia el sistema.

- Evapotranspiración potencial (ETP): el cual brinda una aproximación de lo que se puede evapotranspirar en el sistema si éste no tuviera restricción alguna del recurso hídrico.

- PP-ETP: al calcular esta diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo, se pueden clasificar los meses húmedos (si $PP > ETP$) y los meses secos (si $PP < ETP$).

- Reserva de agua en el suelo (ALM): depende de las características físicas y biológicas del suelo (textura del suelo y cobertura vegetal), cuyo valor máximo corresponde a la Capacidad de Almacenamiento de Agua en el Suelo. En algunos casos se puede utilizar como reserva máxima 100 mm (Thornthwaite, 1948), sin hacer diferencia entre el tipo de suelo y la cobertura vegetal.

Se estima sumando los incrementos PP-ETP sólo cuando son meses húmedos. A estos incrementos se le agrega la reserva del mes anterior al mes que se está calculando:

$$ALM = ALM_{i-1} + (PP-ETP) \quad (4.16)$$

- Variación de la reserva (CALM): se calcula con la diferencia entre la reserva del mes en el que se realiza el cálculo y la reserva del mes anterior:

$$CALM = ALM_i - ALM_{i-1} \quad (4.17)$$

- Evapotranspiración real (ETR): se considera que es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes y depende estrechamente del volumen de agua disponible. Esto quiere decir que la precipitación en el mes considerado y la reserva existente será el agua disponible para evaporar. Cuando la precipitación cubre la demanda potencial (generalmente en el periodo húmedo), se puede decir que:

$$ETR = ETP \quad (4.18)$$

Si la ETP excede a la PP (periodo seco), el agua que se evapora será la de la $PP + CALM$ (tomada como valor absoluto):

$$ETR = PP + |CALM| \quad (4.19)$$

• Falta de agua (DEF): también llamado déficit, se considera como el volumen de agua faltante para cubrir las necesidades hídricas potenciales del sistema (para evapotranspirar):

$$DEF = ETP - ETR \quad (4.20)$$

• Exceso de agua (EXC): es el recurso que excede la reserva máxima y que se habrá perdido:

$$EXC = PP - ETP - CALM \quad (4.21)$$

• Desagüe (ESC): considera todas las descargas realizadas por la cuenca, es el exceso de agua se considera que serán escorrentías que se dirigirán hacia los cauces naturales. Thornthwaite señaló que el 50% del excedente de agua de un mes en cuestión escurre hacia los ríos, mientras que el resto lo hará de manera proporcional en los meses siguientes:

$$ESC = 0.5 * (ESC_{i-1} + EXC) \quad (4.22)$$

Finalmente, la ecuación para estimar el balance hidrológico de la subcuenca es:

$$P = ETR + \text{escorrentías}, \text{ o; } P = ETR + D \quad (4.23)$$

Si la estimación en el balance es correcta, la precipitación será igual a la suma de la evapotranspiración real más el desagüe en el sistema. Las reglas anteriores son de igual manera listadas en el Cuadro 4.23. Ejemplo de una tabla de cálculo de dichos campos puede ser observada en el Cuadro 4.24 el cual se presenta como un caso de estudio en la publicación original de Thornthwaite de 1948.

Cuadro 4.23.- Operaciones y restricciones para el cálculo de los diferentes parámetros del balance hídrico climático.

Fuente: Santillán *et al.*, 2013.

Parámetro	Operaciones	Restricciones
<i>P</i> : precipitación media mensual	<i>P</i>	-
<i>ETP</i> : evapotranspiración potencial mensual	<i>ETP</i>	-
<i>P-ETP</i> : diferencia entre <i>P</i> y <i>ETP</i>	<i>P-ETP</i>	-
<i>R</i> : reserva del suelo	$R_{i-1} + (P_i - ET_i)$ $R_i = R_{máx}$ 0	<i>Si</i> $0 < R_{i-1} + (P_i - ET_i) < R_{máx}$ <i>Si</i> $R_{i-1} + (P_i - ET_i) > R_{máx}$ <i>Si</i> $0 > R_{i-1} + (P_i - ET_i)$
<i>VR</i> : Variación de la reserva	$VR_i = R_i - R_{i-1}$	-
<i>ETR</i> : evapotranspiración real	$ETR_i = ET_i$ $ETR_i = P_i + VR_i $	<i>Solo en periodos húmedos</i> <i>En periodos secos</i>
<i>DEF</i> : déficit de agua	$D_i = ET_i - ETR_i$	-
<i>EX</i> : exceso de agua	$EX_i = [P_i - ET_i - VR_i]$ $EX_i = 0$	<i>Si</i> $(P_i - ET_i) > 0$ <i>Si</i> $(P_i - ET_i) \leq 0$
<i>D</i> : drenaje	$D = 0.5[D_{i-1} + EX_i]$	-

Nota: *i* se refiere al mes en curso, e *i-1* al mes anterior.

Cuadro 4.24.- Ejemplo de balance hídrico, unidades en cm.

Fuente: Thornthwaite, 1948.

ITEM	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Y
<i>Seattle, Wash.</i>													
Potential evap.	1.3	1.8	3.1	4.9	7.6	9.6	11.4	10.5	7.4	4.7	2.5	1.6	66.4
Precipitation	12.3	9.7	7.8	6.0	4.7	3.4	1.5	1.7	4.3	7.1	12.3	13.9	84.7
Storage change	0	0	0	0	-2.9	-6.2	-0.9	0	0	2.4	7.6	0	
Storage	10.0	10.0	10.0	10.0	7.1	0.9	0	0	0	2.4	10.0	10.0	
Actual evap.	1.3	1.8	3.1	4.9	7.6	9.6	2.4	1.7	4.3	4.7	2.5	1.6	45.5
Water deficiency	0	0	0	0	0	0	9.0	8.8	3.1	0	0	0	20.9
Water surplus	11.0	7.9	4.7	1.1	0	0	0	0	0	0	2.2	12.3	39.2
Runoff *	8.9	8.4	6.5	3.8	1.9	1.0	0.5	0.2	0.1	0.1	1.1	6.7	39.2
Moisture ratio	8.47	4.38	1.52	0.22	-0.38	-0.65	-0.87	-0.84	-0.42	0.54	3.92	7.68	
<i>Manhattan, Kans.</i>													
Potential evap.	0.0	0.0	1.9	5.1	9.3	13.9	16.4	15.0	10.1	5.2	1.4	0.0	78.3
Precipitation	2.0	3.0	3.8	7.1	11.1	11.7	11.5	9.5	8.6	5.8	3.8	2.2	80.1
Storage change	2.0	2.8	0	0	0	-2.2	-4.9	-2.9	0	0.6	2.4	2.2	
Storage	7.2	10.0	10.0	10.0	10.0	7.8	2.9	0	0	0.6	3.0	5.2	
Actual evap.	0.0	0.0	1.9	5.1	9.3	13.9	16.4	12.4	8.6	5.2	1.4	0.0	74.2
Water deficiency	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	1.5	0.0	0.0	0.0	4.1
Water surplus	0.0	0.2	1.9	2.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
Runoff *	0.0	0.1	1.0	1.5	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	5.8
Moisture ratio	∞	∞	1.00	0.39	0.19	-0.16	-0.30	-0.37	-0.15	0.11	1.71	∞	

*Assuming that 50 per cent of the water available for runoff in any month is held over until the following month. In watersheds of less than 100 square miles the percentage is probably smaller.

4.6.1. Generación del modelo y calibración

Debido a la intención de analizar el comportamiento hidrológico dentro de la subcuenca, la distribución espacial de la información climatológica, edafológica y de cobertura supone un reto en cuanto al cómo realizar los cálculos para obtener valores representativos de las distintas unidades ambientales a generarse. La información climatológica publicada por el CCA de la UNAM, tanto histórica como de escenarios de cambio climático, disponible en imágenes con formato *raster* en resolución espacial de 30" x 30" (926 x 926 m aproximadamente), corresponden a una superficie en la cual se pierde valioso grado de detalle en relación a la distribución de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, obtenida por la escala a la que se manejó la información de uso de suelo y vegetación.



Figura 4.29.- Ejemplo del procesamiento de información desde archivos GeoTIFF, resolución espacial de 30" x 30".

De esta manera, se propone que la unidad básica de procesamiento corresponda a una celda con resolución espacial de 100 metros por lado, 1 ha de superficie, siendo generados nuevos archivos en el mismo formato que contengan la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo a partir de la intersección y procesamiento de los tipos de vegetación y suelo que se han estado operando en el Sistema de Información Geográfica.

Ejemplo de la información climatológica disponible específicamente para la zona de estudio se aprecia en la Figura 4.29, en la cual es posible apreciar la cobertura dentro de la zona de influencia de la subcuenca, en este caso la precipitación media mensual acumulada en mm para el mes de enero en el MCG GFDL con RCP 4.5 y en horizonte temporal cercano (2015-2039), el cual fue extraído del archivo que contiene el re-escalamiento realizado para el territorio nacional.

Como fue mencionado anteriormente, la propuesta consistió en emplear cada celda como una unidad básica de procesamiento con su propio BHC y de esta manera obtener resultados en un alto grado de detalle espacial para la subcuenca, debido a que el computo de estos balances sería muy difícil de realizar mediante operadores como el álgebra de mapas en Sistemas de Información Geográfica como ArcMap, *software* especializado como MATLAB permiten hacer el procesamiento de matrices de datos como en este caso en el que el balance hídrico podrá realizarse “pixel a pixel” atendiendo todas las operaciones y restricciones para el cálculo de los diferentes parámetros del balance, y de igual manera exportar aquellas matrices de interés para analizar el comportamiento espacial de variables como la evapotranspiración potencial y real o el de las zonas de producción de mayores escorrentías, con esto se espera que los tiempos de operaciones computacionales se vean reducidos de manera sustancial ya que el procesamiento de matrices es más eficiente y se emplearía un código especialmente elaborado para el caso en el que se pueda alimentar sin diferencia con valores climatológicos históricos y de escenarios de cambio climático.

4.6.1.1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

Para poder emplear el método de balance hidrológico climático debe de conocerse cuál es la cantidad de agua que podrá ser almacenada por el suelo, a partir de estos límites físicos es que se podrán estimar las relaciones de entrada-salida del recurso al reservorio que representa este medio en función de los procesos de precipitación y evapotranspiración. Esta variable se expresa en unidades lineales, a manera de lámina de agua disponible, lo cual debe coincidir con las

unidades empleadas para la precipitación y evapotranspiración potencial a presentarse en el sitio, es dependiente de las características edafológicas de la zona y del tipo de cobertura existente en la superficie.

4.6.1.1.1. Propiedades edafológicas

La Capacidad de Agua Disponible (CAD) comprende la cantidad de agua que se encuentra disponible en el suelo y que es susceptible de ser aprovechada por las plantas, es el valor total acotado por la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP), se expresa en una lámina correspondiente a mm de agua por metro de suelo. En el caso específico de este proyecto de investigación se calculó dicho valor siguiendo la metodología mostrada en Rodríguez *et al.* (2019), que a su vez emplea las ecuaciones de Saxton y Rawls (1986), las cuales permiten determinar dichos límites en función de la textura del suelo.

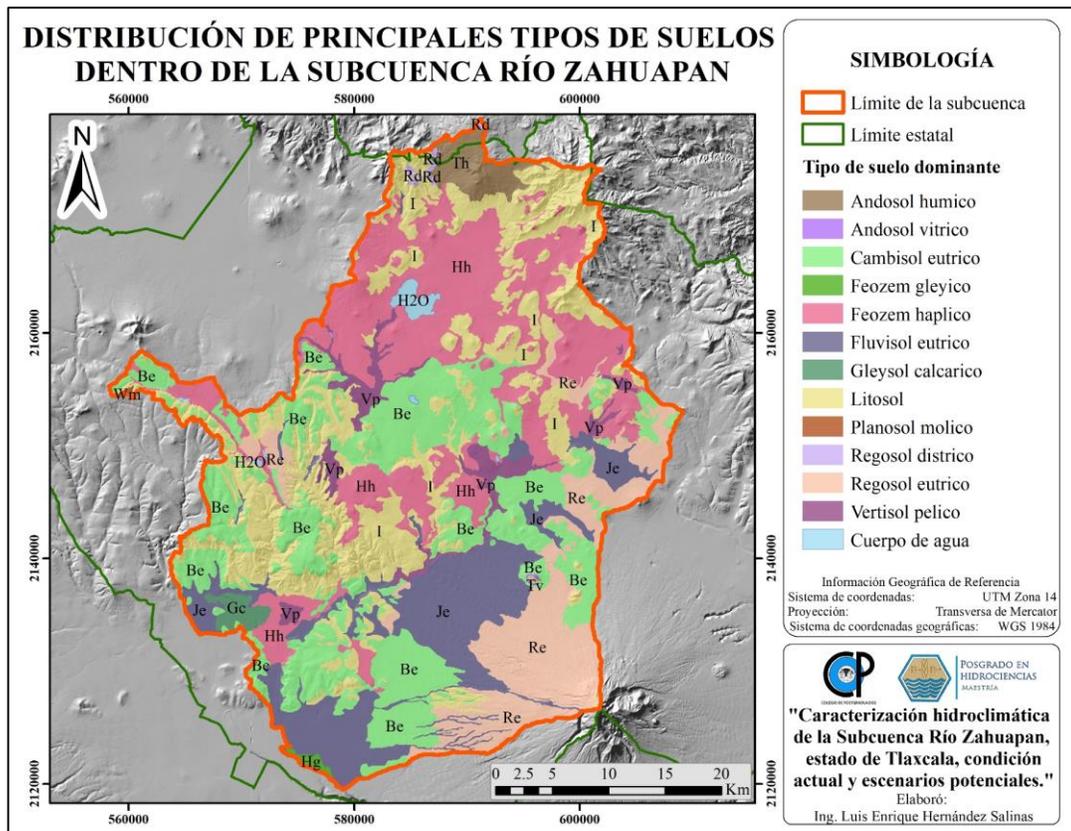


Figura 4.30.- Principales unidades de suelo; Cartas 1:50,000 - INEGI.

La información requerida para el empleo de las ecuaciones antes mencionadas se obtuvo en su mayoría mediante el análisis de la información edafológica generada por INEGI. De manera inicial debe de precisarse que, si bien en el apartado de descripción de la subcuenca de esta tesis se ha mostrado la distribución espacial de las principales unidades de suelo existentes en el territorio, estas corresponden a los límites establecidos en las cartas edafológicas con escala 1:250,000. Lo cual se consideró que, si bien es relativamente una buena escala, el detalle de la distribución de suelos podría ser mayor considerando el interés de este proyecto de analizar el comportamiento que pudiera presentarse en zonas en específico que deban ser susceptibles a mayores impactos del cambio climático. Por lo cual se procedió al empleo de las cartas edafológicas con escala 1:50,000, las cuales fueron digitalizadas en el *software* ArcMap, obteniéndose polígonos más detallados que obedecen a las relaciones fisiográficas del territorio y a las cuales se les asignó el valor de la unidad dominante a dicha escala.

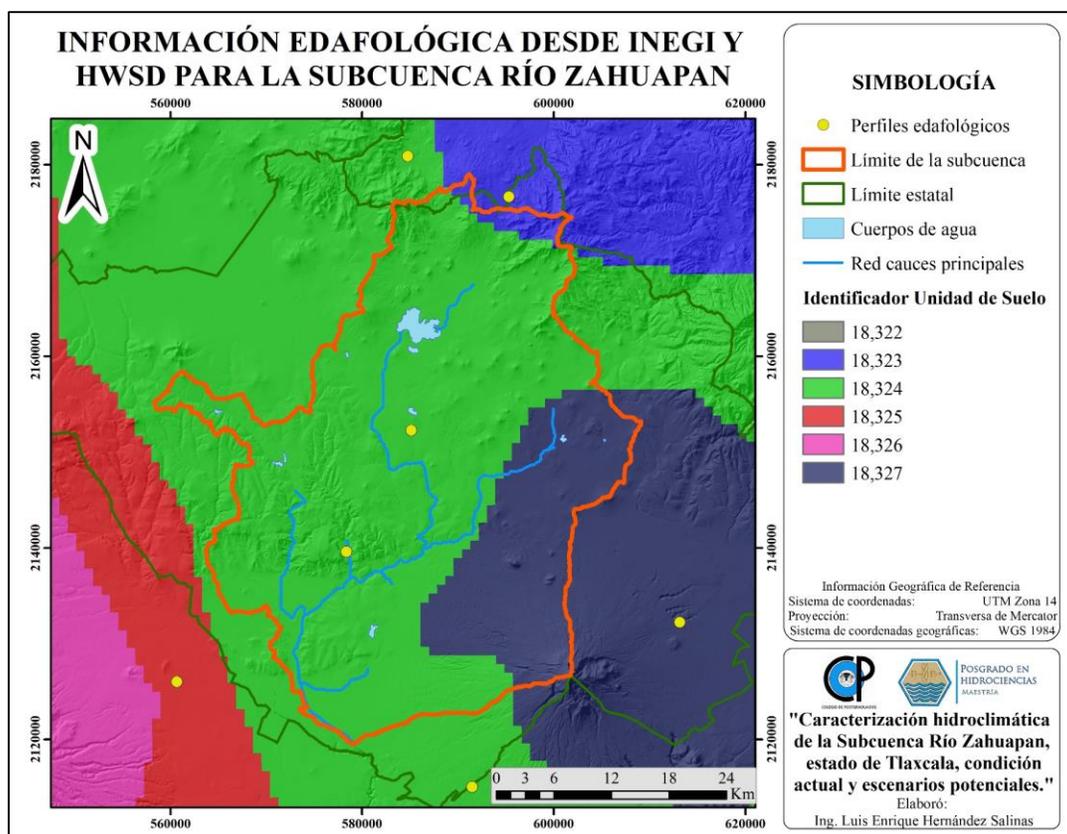


Figura 4.31.- Distribución de unidades de suelo desde el HWSO y Perfiles Edafológicos Serie II - INEGI.

Posteriormente, a cada unidad de suelo se le asignó una proporción de partículas: arenas, limos y arcillas, específica considerando la información de dichos campos presente en la Serie II de Perfiles Edafológicos generada por INEGI, de los cuales existen 6 dentro y en la zona de influencia de la subcuenca que permiten estandarizar ciertos valores a determinadas unidades de suelo, de igual manera se tomaron como referencia los valores correspondientes a las grupos y unidades de suelos detallados en el *Harmonized World Soil Database (HWSO)* v.2 de la FAO que se distribuyen en la zona de estudio y coinciden con los existentes en el área de interés descritos en las cartas de INEGI.

Finalmente, se determinaron los valores únicos de los porcentajes de las partículas del suelo para cada una de las unidades edafológicas presentes en las cartas de INEGI a partir de la coincidencia espacial con las fuentes de referencia disponibles. Cabe aclarar que, si bien algunas unidades fueron coincidentes en su totalidad, en algunas otras se optó por emparentarlas con la

unidad de mayor similitud, al menos en cuando a grupo edafológico, con la que se compartiera distribución espacial. Posteriormente se hizo uso de las ecuaciones de Saxton y Rawls (1986) para calcular el PMP, así como la CC y finalmente la CAD.

$$CC = \left(\frac{0.3333}{A} \right)^{B^{-1}} \quad (4.24)$$

$$PMP = \left(\frac{15}{A} \right)^{B^{-1}} \quad (4.25)$$

Donde:

$$A = \exp (- 4.396 - 0.715 (\% \text{ arcilla}) - 0.000488 (\% \text{ arena})^2 - 0.00004285 (\% \text{ arena})^2 (\% \text{ arcilla}))$$

$$B = - 3.14 - 0.00222 (\% \text{ arcilla})^2 - 0.00003484 (\% \text{ arena})^2 (\% \text{ arcilla})$$

Dado que la determinación de la máxima profundidad radicular a alcanzarse por cada tipo de cobertura vegetal depende de la textura del suelo, se determinó la clase textural de cada tipo de suelo a partir del triángulo de clasificación textural del suelo del *United States Department of Agriculture* (USDA) para posteriormente equiparar dichas clases con las presentadas por Thornthwaite y Mather en su publicación original, dicha comparativa se aprecia en el Cuadro 4.25.

Cuadro 4.25.- Características físicas asignadas a los suelos presentes en la subcuenca.

Suelo en carta	Suelo equiparado	Arena	Limo	Arcilla	A	B	CC (m)	PMP (m)	CAD (m)
Feozem háplico	Pheozem háplico	23	32	45	0.00014	-8.46487	0.398	0.254	0.144
Fluvisol eútrico	Andosol úmbrico	51	44	6	0.00131	-3.69583	0.224	0.080	0.144
Regosol dístrico	Pheozem háplico	23	32	45	0.00014	-8.46487	0.398	0.254	0.144
Regosol eútrico	Andosol úmbrico	51	44	6	0.00131	-3.69583	0.224	0.080	0.144
Andosol vítrico	Andosol lúvico/úmbrico	50	36	14	0.0003	-4.81125	0.232	0.105	0.127
Vertisol pélico	Vertisol cálcico/eútrico	35	14	51	0.00001	-11.12713	0.400	0.284	0.116
Litosol	Leptosol lítico	46	23	31	0.00003	-7.55878	0.290	0.175	0.115
Feozem gleyico	Pheozem endopetrodúrico lúvico	46	18	36	0.00001	-8.67109	0.310	0.200	0.110
Andosol húmico	Andosol endoléptico humbrihúmico	63	26	11	0.00013	-4.88322	0.200	0.092	0.108
Cambisol eútrico	Cambisol eútrico	54	23	24	0.00003	-6.81202	0.253	0.145	0.108
Gleysol calcárico	Cambisol eútrico	54	23	24	0.00003	-6.81202	0.253	0.145	0.108
Planosol mólico	Cambisol eútrico	54	23	24	0.00003	-6.81202	0.253	0.145	0.108

Cuadro 4.26.- Asignación de clase textural por unidad dominante del suelo.

Unidad Dominante	Descripción	Área (ha)	Clase Textural USDA	Clase Textural Thornthwaite	CAD (mm)
Be	Cambisol eútrico	38,788	Franco arcilloso arenoso	Clay loams	108
I	Litosol	37,251	Franco arcilloso arenoso	Clay loams	115
Hh	Feozem háplico	36,922	Arcilla	Clay	144
Je	Fluvisol eútrico	21,361	Franco arenoso	Fine sandy loams	144
Re	Regosol eútrico	18,929	Franco arenoso	Fine sandy loams	144
Vp	Vertisol pélico	5,165	Arcilla	Clay	116
Th	Andosol húmico	3,310	Franco arenoso	Fine sandy loams	108
Gc	Gleysol calcárico	1,186	Franco arcilloso arenoso	Clay loams	108
Hg	Feozem gleyico	370	Arcilla arenosa	Fine sandy loams	110
Rd	Regosol dístrico	339	Franco	Silt loams	144
Tv	Andosol vítrico	59	Franco	Silt loams	127
Wm	Planosol mólico	57	Franco arcilloso arenoso	Clay loams	108

Es de precisarse que el HWSD de la FAO asigna un rango de capacidad de agua disponible (AWC por sus siglas en inglés) por unidad de suelo, posterior a los cálculos realizados mediante las ecuaciones antes descritas se pudo verificar que los resultados obtenidos se hayan dentro de dicho rango en la zona de estudio. Con lo cual confirmamos que si se desea determinar la capacidad de agua disponible de un suelo en el mayor detalle posible es adecuado emplear las ecuaciones para su estimación, y que si solo se desea una aproximación del mismo valor se puede confiar del rango descrito en dicha fuente de información.

4.6.1.1.2. Cobertura vegetal y uso de suelo

El segundo valor necesario para determinar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo está vinculado a la capacidad de extracción de agua por las plantas desde el mismo, corresponde a la profundidad radicular de la vegetación y está expresada en metros. Se trata de un valor dependiente del tipo de cobertura vegetal existente y del uso de la tierra, por lo cual se hizo uso de la información generada por INEGI, al poseer los recursos de información estandarizados de conocimiento nacional, de manera específica las Coberturas de Uso de Suelo y Vegetación en sus distintas Series.

De manera específica para la labor de generación y calibración del modelo hidrológico se empleó la distribución espacial presente en la Serie II, pues ésta considera al año 1993 como referencia de la información, aunque se precisa que la información de campo fue recopilada en el periodo 1996-1999. Se consideró que era la mejor fuente de información de la cubierta vegetal disponible para el intervalo 1988-1997, que corresponde al periodo de años con registros en la estación hidrométrica 18140, y que permitieron comparar los resultados de las simulaciones y realizar las modificaciones necesarias.

A partir de los tipos de vegetación y con consideración del tipo de textura del suelo, se determinó la profundidad radicular máxima a desarrollarse de acuerdo a la tabla expresada en la metodología original y apoyándose de la homologación realizada por el trabajo de Rodríguez *et al.* (2019).

Cuadro 4.27.- Profundidades radiculares máximas para cada tipo de cobertura y en función de la clase textural del suelo.

Descripción de Uso de Suelo y Vegetación INEGI	Tipo de vegetación Thornthwaite	Profundidad radicular por clase textural Thornthwaite (m) *				
		FS	FSL	SL	CL	C
Bosque de encino	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque de encino-pino	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque de oyamel	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque de pino	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque de pino-encino	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque de táscate	Mature	2.539	2.03	2.03	1.625	1.189
Bosque cultivado plantación forestal permanente	Orchard	1.524	1.692	1.524	1.015	0.677
Pastizal halófilo	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Pastizal inducido	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Pradera de alta montaña	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Tular	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Vegetación secundaria arbusativa de bosque de encino	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Vegetación secundaria arbusativa de bosque de encino-pino	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Vegetación secundaria arbusativa de bosque de pino	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Vegetación secundaria arbusativa de bosque de pino-encino	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Vegetación secundaria arbusativa de bosque de táscate	Deep	1.015	1.015	1.271	1.015	0.677
Agricultura de riego anual	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Agricultura de riego anual y semipermanente	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Agricultura de riego plantación agrícola permanente	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Agricultura de riego semipermanente	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Agricultura de temporal anual	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Agricultura de temporal anual y permanente	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509

Descripción de Uso de Suelo y Vegetación INEGI	Tipo de vegetación Thornthwaite	Profundidad radicular por clase textural Thornthwaite (m) *				
		FS	FSL	SL	CL	C
Agricultura de temporal plantación agrícola permanente	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	Moderate	0.762	1.015	1.015	0.814	0.509
Sin vegetación aparente	Shallow	0.509	0.509	0.634	0.405	0.253
Vegetación secundaria herbácea de bosque de táscate	Shallow	0.509	0.509	0.634	0.405	0.253
Zona urbana	Shallow	0.509	0.509	0.634	0.405	0.253
Cuerpo de agua	None	0	0	0	0	0

*Arena fina - Fine sandy (FS), Franco arenoso fino – Fine sandy loams (FSL), Franco limoso – Silt loams (SL), Arcilloso limoso – Clay loams (CL), Arcillas – Clay (C).

4.6.1.1.3. Generación de la capa final

Mediante intersección de las capas con la información edafológica y de profundidad radicular se obtuvieron combinaciones del tipo de vegetación y clase textural del suelo, para generalizar aquellos polígonos que compartieran dichos campos, posterior a ello se procedió a realizar una multiplicación de campos dentro de la tabla de atributos para obtener el valor final de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en función de cada unidad edafológica específica y tipo de cobertura formada. Este archivo shapefile fue convertido a una imagen *raster* en formato *.tif*, cuya profundidad de pixel (*pixel depth*) fue de 16 bits entero con signo (*16 bit Signed Integer*) para poderlo procesar junto con el resto de archivos.

4.6.1.2. Coberturas climatológicas

Como se mencionó anteriormente, para delimitar la subcuenca se determinó cómo boquilla el punto previo en el cual las aguas del río Zahuapan se incorporan al cauce del río Atoyac, decisión que se reforzó al existir en ese mismo punto la estación hidrométrica 18140-Xicotzingo de CONAGUA. Al igual que muchas estaciones en el país desafortunadamente solo se cuenta con algunos años de registros, siendo el último intervalo efectivo la serie diciembre de 1988 a marzo 1998. Debido a lo anterior, se contó con 8 años completos para comparar los escurrimientos registrados contra los simulados por el balance hidrológico alimentado con los registros climatológicos del mismo intervalo.

4.6.1.2.1. Precipitación media mensual

Debido a que la naturaleza de este proyecto requiere de una distribución espacial de las variables involucradas, se generaron las capas de cobertura de la precipitación mensual acumulada para los 12 meses de los 8 años requeridos (1989-1997), considerando años hidrológicos. Estos recursos se generaron a partir del análisis de los registros históricos de los valores mensuales acumulados reportados por las 20 estaciones que se encuentran dentro de la subcuenca y en su área de influencia.

La climatología histórica se obtuvo del portal oficial de CONAGUA para las estaciones de interés, para cada una de ellas se realizó mediante *software* Excel un proceso de control de calidad en la cual se ignoraron aquellos valores mensuales cuya diferencia con respecto a la media histórica fuera mayor a dos veces la desviación estándar, como fue realizado por Fernández-Eguiarte *et al.* (2014). Posterior a ello se construyeron tablas anuales que condensaron los valores de precipitación en columnas mensuales y filas por estación, agregando en columnas adicionales la longitud y latitud de las mismas, dichas tablas anuales fueron convertidas finalmente a tablas en formato de texto separado por comas (.CSV) para cada mes.

Mediante *Model Builder* de ArcMap se diseñaron herramientas personalizadas que pudieran realizar los procedimientos necesarios para obtener las coberturas finales de manera más eficiente, en primer lugar, una de ellas consistió en importar las tablas mensuales en formato .CSV, asignarle el sistema de referencia espacial UTM Zona 14 y guardar la capa generada como un archivo *Shapefile* de puntos. La segunda de ellas es alimentada por los archivos de puntos correspondientes a las estaciones climatológicas para realizar una interpolación por el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés), con poder 3.6, dentro del área de influencia de la subcuenca, con los valores de precipitación reportados en cada estación, asignando en este mismo paso una resolución espacial de 1ha por celda. Posteriormente, se truncaron los valores a enteros, se recortó la imagen *raster* a la superficie específica de la subcuenca y, finalmente, los archivos fueron guardados en un formato .tif con una profundidad de pixel (*pixel depth*) de 16 bits entero con signo (16 *bit Signed Integer*). De esta manera se obtuvieron los 108 archivos *raster* mensuales de la distribución espacial de la precipitación acumulada para los 9 años de referencia.

La selección del método de interpolación empleado parte de lo desarrollado por Díaz *et al.* (2008) quienes realizaron una comparación de cuatro métodos de interpolación: inverso de la distancia ponderada, kriging, co-kriging y *thin plate smoothing spline*, de datos puntuales de precipitación pluvial en la región de sotavento y barlovento del Golfo de México. Si bien el método de *thin plate smoothing spline* genera las mejores predicciones de acuerdo a los autores, el empleo de dicho método requiere de *software* y conocimiento más especializado, mientras que los métodos de kriging e IDW arrojan resultados aceptables, siendo este último el de menor complejidad y cuyo empleo, dadas las características del proyecto es adecuado.

4.6.1.2.2. Temperatura media mensual

La información necesaria para las capas de distribución espacial de la temperatura media mensual para el intervalo de años de referencia fue descargada desde las bases de datos abiertos del portal del CCA de la UNAM, donde se encuentran archivos en formatos *raster* tipo TIFF que contienen reanálisis mensuales de la temperatura máxima y mínima mensual a nivel nacional para el periodo 1979-2009. Dicha información ha sido procesada por expertos en el área mediante control de calidad de los registros históricos y considerado el efecto de la topografía. Debe precisarse que dichas imágenes originales poseen una resolución espacial de 30" x 30" (926 x 926 m aproximadamente).

En este caso se realizó nuevamente una herramienta personalizada, la cual consiste en ser alimentada con la imagen mensual para todo el territorio nacional, la cual recortó la zona de influencia de la subcuenca, posteriormente dicha imagen, que hasta este punto posee un sistema de referencia espacial de coordenadas geográficas WGS 1948, es proyectada al sistema UTM con Zona 14, realizando a su vez una asignación de resolución espacial de 1ha por celda, con remuestreo por técnica del punto más cercano. Finalmente, el archivo es recortado a los límites de la subcuenca y almacenado. De esta manera se obtuvieron las 216 imágenes mensuales, y posteriormente se realizó mediante *Raster Calculator* un promedio simple de las temperaturas máxima y mínima en cada mes para poder obtener la capa de temperatura media mensual de los 108 meses correspondientes a los 9 años de interés.

4.6.1.2.3. Evapotranspiración potencial

Siendo obtenidos los archivos *raster* con la distribución espacial de temperatura media mensual en la subcuenca, el siguiente paso fue calcular la evapotranspiración potencial mensual mediante el método de Thornthwaite. Los cálculos de Thornthwaite, originalmente publicados en 1948, están 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 del mes.

El método es muy empleado en hidrología y en la estimación del balance hídrico para climatología e hidrología de cuencas, de igual manera es empleado en algunos índices y clasificaciones climáticas. La metodología original establece que:

$$e = 0 \quad \text{siempre que } T_m \leq 0^\circ\text{C} \quad (4.26)$$

$$e = 16 \cdot (10 \cdot T_m / I)^a \quad \text{siempre que } 0^\circ\text{C} < T_m \leq 26^\circ\text{C} \quad (4.27)$$

$$e = -415.85 + 32.34 T_m - 0.43 T_m^2 \quad \text{siempre que } T_m > 26^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

Donde:

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

T_m : temperatura media mensual en $^\circ\text{C}$

I : índice de calor anual,

Que considera:

$I = \sum i_j$; $j = 1, \dots, 12$; que se calcula a partir del índice de calor mensual, i , como suma de los doce índices de calor mensuales:

$$i_j = (T_{mj} / 5) 1.514 \quad \text{cuando } T_m \geq 0^\circ\text{C}$$

a : parámetro que se calcula, en función de I según la expresión:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.7912 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

Para el cálculo de la ETP según el método de Thornthwaite ETP_{Thor} de un mes determinado será preciso corregir la evapotranspiración sin ajustar "e" mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día.

$$ETP_{Thor} = e \cdot L \quad (4.29)$$

$$L_i = Nd_i / 30 \cdot N_i / 12 \quad (4.30)$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar en mm/mes

L: factor de corrección del número de días del mes (Nd_i) y la duración astronómica del día N_i (horas de sol)

En la actualidad existen cuadros que condensan el factor de corrección mensual para determinados rangos de latitud, desde las cuales fue posible extraer los valores correspondientes a las latitudes 20° y 15° Norte, a partir de la cual se hizo una interpolación simple para la latitud 19.44° que corresponde al punto central de la subcuenca, dichos factores se muestran en el Cuadro 4.28.

Cuadro 4.28.- Factor de corrección mensual para la latitud central de la subcuenca.

Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
20°	0.94	0.88	1.02	1.04	1.12	1.10	1.13	1.09	1.01	0.99	0.92	0.93
15°	0.96	0.89	1.03	1.03	1.09	1.07	1.10	1.08	1.01	1.00	0.94	0.96
19.44°	0.942	0.881	1.021	1.039	1.117	1.097	1.127	1.089	1.010	0.991	0.922	0.933

Los procesos fueron realizados mediante *Raster Calculator*, inicialmente se calculó el índice de calor anual a partir de la sumatoria de los índices de calor mensuales, lo cual se guardó como un archivo tipo *raster* independiente. Posterior a ello se calculó el parámetro “a” de la ecuación, siendo a su vez también almacenado en un archivo *raster*; y finalmente se ejecutó la ecuación de evapotranspiración mensual acumulada considerando los factores de corrección mensual. Por último, las imágenes fueron guardadas en formato *.tif* con una profundidad de pixel (*pixel depth*) de 16 bits Entero con signo (*16 bit Signed Integer*).

4.6.1.3. Desarrollo del código de programación en MATLAB

Como se mencionó anteriormente, la esencia del método del balance hídrico seleccionado consiste en realizar una serie de operaciones sucesivas que pretenden representar las relaciones planta-suelo-atmosfera con el agua meteorológica. Los cálculos para cada mes consideran de manera inicial la precipitación acumulada, la evapotranspiración potencial y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, debido a que dichos valores deben de ser específicos al sitio y considerando la heterogeneidad de dichas variables en la subcuenca es que se propuso realizar dicho balance a unidades espaciales más pequeñas.

Dada la intención de realizar los cálculos del balance hídrico a una escala tan detallada como lo es 1 ha por celda, se consideró que el empleo de un *software* como lo es MATLAB podría eficientizar los tiempos de cómputo al tratarse de una herramienta especializada en el procesamiento de matrices, siendo las operaciones a realizarse de un nivel básico dadas las capacidades de este *software*. De igual manera se optó por esta herramienta considerando que la forma secuencial en la que deben de realizarse las operaciones del balance puede ser fácilmente asimiladas en una rutina y adaptadas a un algoritmo.

Por ello es que se optó por determinar que la unidad mínima espacial de procesamiento sería una celda de 1 hectárea de superficie, como ha sido descrito anteriormente con la generación de los recursos climatológicos y de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, se previó estandarizar todas las imágenes hacia un mismo formato. En el cual debían de compartirse sobre todo las dimensiones de las “matrices” de datos que representan las imágenes en formato *raster*, siendo de 509 columnas por 595 filas, lo cual fue posible al siempre emplear como límites de las imágenes el archivo *shapefile* correspondiente al polígono de la subcuenca, además de homogeneizar el tipo de almacenamiento de la información a valores de 16 bits en Entero con Signo para poder realizar las operaciones. De igual manera debe de precisarse que se hizo uso de la rutina generada por Zhang Jiang (2021) para exportar las matrices obtenidas como productos de los cálculos a imágenes en formato TIFF.

El diseño del código de programación partió de la conversión de las reglas y operaciones del método a un algoritmo que considerara las limitantes impuestas por el sistema suelo-agua, de esta manera se desarrolló una rutina para cada mes en el cual se calcularan los valores para cada

una de los campos necesarios, debe de prestarse atención a que muchas de las operaciones consideran el valor de determinadas variables en el mes anterior por lo que deber de existir una continuidad mes a mes.

Entre los trabajos que emplean la misma metodología del BHC se encontraron algunas diferencias entre las restricciones y fórmulas para el cálculo de algunas variables del balance hídrico, sobre todo en la estimación del almacenamiento de humedad en el suelo, o reserva de agua en el suelo. En el presente trabajo se consideraron las reglas definidas en los trabajos de Santillán *et al.* (2013), así como de lo expresado por Nugroho *et al.* (2019) quienes emplean la variable Perdida de Agua Potencial Acumulable (PAPA) expresada en la metodología original, la cual es calculada como la suma acumulativa de los valores de precipitación menos la evapotranspiración potencial durante los meses en los cuales el resultado es negativo. Dicha variable se ve incrementada durante los meses secos y reducida durante la temporada húmeda debido a la recarga de humedad en el suelo, el valor se vuelve cero cuando el suelo alcanza su máxima capacidad de almacenamiento de agua. El uso de la anterior variable se emplea en la siguiente ecuación, la cual es usada durante los meses en los cuales el valor de P-ETP es negativo.

$$ALM = CAAS \cdot e^{PAPA/CAAS} \quad (4.31)$$

Donde:

ALM = Almacenamiento de agua en el suelo (mm)

CAAS = Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

PAPA = Perdida de agua potencial acumulable (mm)

Como ha sido señalado en los trabajos de Dourado *et al.* (2010) y de Rodríguez *et al.* (2019), el iniciar la cuenta del balance hídrico representa uno de los mayores retos de esta metodología pues los cálculos de un mes dependen de la cantidad de agua almacenada por el suelo en el mes anterior. De esta manera es que es ampliamente recomendado iniciar el balance hídrico en el último mes de la temporada húmeda, lo que en climas templados y con un periodo de lluvias bien marcado puede considerarse como el último mes en el que la precipitación menos la evapotranspiración potencial sea positiva, y asumir que en el mes inmediato anterior el suelo se encuentra en su máxima capacidad de retención de humedad. A partir de este criterio deben de

realizarse los cálculos mensuales hasta concluir un año, descrito como año hidrológico en muchos casos, y considerarlo como año de “entrenamiento” ya que en teoría se contaría con un valor de almacenamiento de agua en el suelo más próximo a la realidad.

Para el presente trabajo se elaboraron dos códigos de programación, uno de ellos para el año de entrenamiento considerando una saturación del suelo al final del periodo húmedo anterior, con año hidrológico de octubre a septiembre, y otro de ellos para continuar el cálculo del balance del año hidrológico considerando las matrices generadas del año de entrenamiento o de balances de años ya estimados.

El código consiste de la operación de 11 variables por mes, con sus respectivas condicionantes y operaciones, siendo guardadas todas ellas finalmente en imágenes tipo *.tif* que pudieran ser después importadas en el sistema de información geográfica y que, posterior a su georeferenciación, sean desplegadas sobre la subcuenca, y de esta manera poder observar el comportamiento espacial de los valores de evapotranspiración real, producción de escorrentía, así como el déficit y exceso de agua en el suelo mes a mes en el territorio de estudio. El Anexo B muestra a mayor detalle el algoritmo desarrollado.

4.6.1.4. Calibración del modelo

Una vez desarrollado y validado el código de programación, se procedió a realizar el cómputo de los balances hidrológicos para los meses en los que se dispone de registros hidrométricos que permitieran realizar una comparativa de la producción de escurrimientos mensuales reportados contra el desagüe simulado, se propone que de esta manera se pueda validar o no el uso del modelo dadas las características específicas del territorio de estudio. El año hidrológico 1988-1989 fue considerado como el año de entrenamiento y en el cual los cálculos del balance partieron de asumir que el agua almacenada en el suelo al inicio del año hidrológico era igual a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Posteriormente se realizó la ejecución de años subsecuentes siendo alimentados con la información resultante del último mes del año hidrológico anterior.

Dada la intención de solo comparar la producción de escurrimientos por la subcuenca en esta etapa, se procedió a importar la imagen correspondiente al sistema de información geográfica, desde el cual se realizaron las operaciones necesarias para obtener el volumen total de escorrentía

en la subcuenca a presentarse en cada mes, los valores se compararon mediante graficas contra los registros históricos de aforo reportados por la estación hidrométrica.



Figura 4.32.- Resultados de escorrentías simuladas contra escurrimientos aforados para la primera evaluación del código.

En la Figura 4.32 se pueden apreciar los resultados de la primera simulación, de la cual se puede observar que los escurrimientos son superiores comparados con los reportados por la estación hidrométrica considerando los 3 primeros años hidrológicos posibles de compararse. Por lo cual la primera decisión en la calibración fue el incrementar los valores de profundidad radicular que podrían alcanzar los diversos tipos de cubiertas vegetales y con lo cual un incremento en ellas significaría un aumento en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, lo cual representa un mayor volumen de almacenamiento de agua antes de que se presente una condición de exceso de humedad y finalmente reducir con ello la producción de escorrentías. Para ello se consideraron los valores descritos en Canadell *et al.* (1996). Se modificó la tabla de atributos del archivo *shapefile* respectivo y volviendo a realizar las operaciones necesarias para obtener una nueva imagen de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo que pudiera ser empleada en la ejecución del código.

Cuadro 4.29.- Valores determinantes de la CAD con cobertura USyV Serie II - INEGI.

Combinación clase textural y tipo de cobertura	CAD (mm)	Adición a la profundidad radicular (m)	Profundidad radicular final (m)	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm)
Fine sandy loams-Mature	144	0.6	2.03	379
Silt loams-Mature	144	0.6	2.03	379
Silt loams-Mature	127	0.6	2.03	334
Fine sandy loams-Mature	108	0.6	2.03	284
Clay-Mature	144	0.6	1.189	258
Silt loams-Deep	144	0.4	1.271	241
Clay loams-Mature	108	0.6	1.625	240
Silt loams-Deep	127	0.4	1.271	212
Clay-Mature	116	0.6	1.189	208
Fine sandy loams-Deep	144	0.4	1.015	204
Fine sandy loams-Moderate	144	0.25	1.015	182
Silt loams-Moderate	144	0.25	1.015	182
Silt loams-Moderate	127	0.25	1.015	161
Clay-Deep	144	0.4	0.677	155
Clay loams-Deep	108	0.4	1.015	153
Fine sandy loams-Deep	108	0.4	1.015	153
Fine sandy loams-Moderate	110	0.25	1.015	139
Fine sandy loams-Moderate	108	0.25	1.015	137
Clay-Deep	116	0.4	0.677	125
Clay loams-Moderate	108	0.25	0.814	115
Clay-Moderate	144	0.25	0.509	109
Fine sandy loams-Shallow	144	0.15	0.509	95
Clay-Moderate	116	0.25	0.509	88
Clay loams-Shallow	115	0.15	0.405	64
Clay loams-Shallow	108	0.15	0.405	60
Clay-Shallow	144	0.15	0.253	58
Clay loams-Deep	115	0.4	0.5	57
Clay loams-Mature	115	0.6	0.5	57
Clay loams-Moderate	115	0.25	0.5	57
Clay loams-Orchard	115	0.5	0.5	57
Clay-Shallow	116	0.15	0.253	47
Cuerpo de agua	500	0	1	500

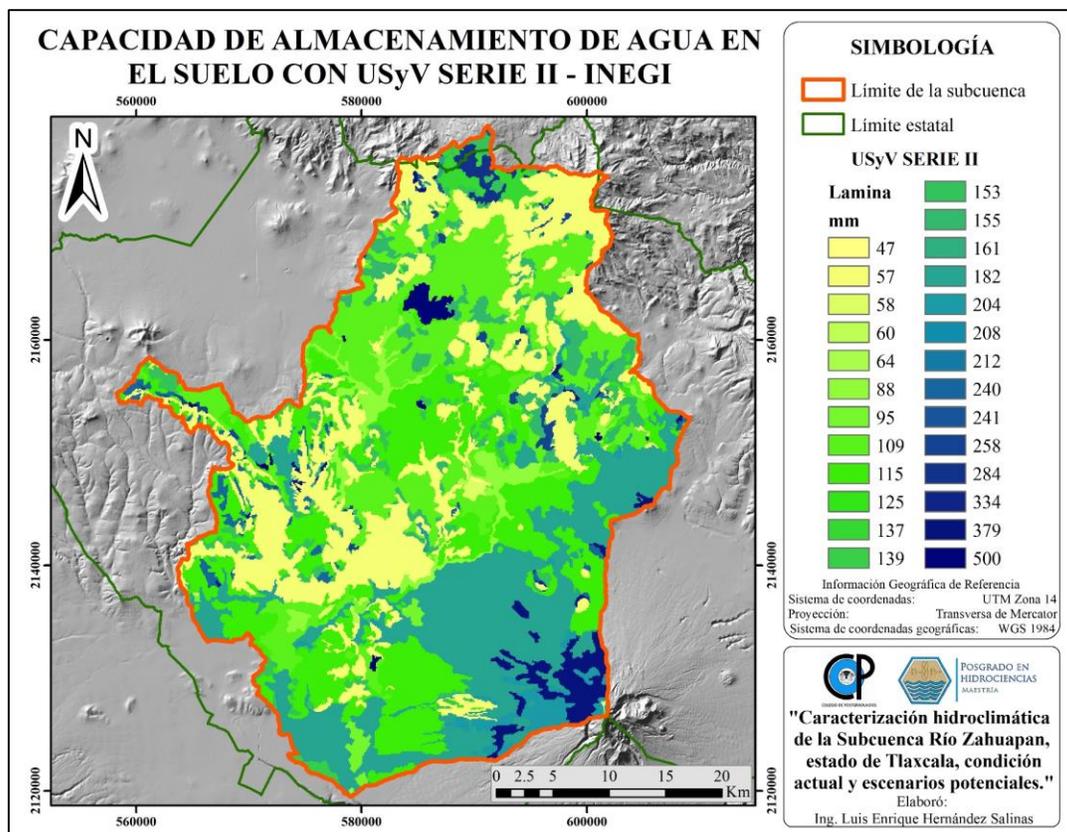


Figura 4.33.- Distribución final de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo; USyV Serie II - INEGI.

Debe observarse también que los volúmenes de desagüe de la subcuenca no responden en el segundo año al proceso de sequía intraestival propio de la subcuenca, lo cual si es visible en los registros de la estación hidrométrica. Por ello, la segunda decisión en el proceso de calibración fue el modificar la regla de producción de escorrentías, teniendo en cuenta investigaciones como del Toro-Guerrero *et al.*, (2014) y Rodríguez *et al.* (2019), en las que se considera que bajo determinadas condiciones del terreno este método también permite asumir que una fracción del excedente de humedad del suelo puede tornarse en agua subterránea por procesos de percolación. Ubicándose la subcuenca sobre el acuífero Alto Atoyac, que es de carácter libre, es posible asumir que en los meses donde se concentra la mayor parte de las precipitaciones (junio-septiembre) las escorrentías correspondan solamente al 50% de los excesos, siendo el resto del excedente recarga directa al acuífero debido a las condiciones de saturación del suelo.

En la Figura 4.34 se puede apreciar los nuevos resultados de las simulaciones considerando las modificaciones propuestas al código, en las cuales se observa la presencia de una sequía intraestival. Aunque es posible observar una diferencia entre las curvas que representan los escurrimientos reales y las escorrentías simuladas, esto puede atribuirse en gran medida a los tiempos de respuesta entre la pluviometría y el aumento de los caudales reales propios de este método (Bohn y Campo, 2010); sin embargo, dado el carácter exploratorio que representa este modelo se considera aceptable sin representar un efecto negativo considerable dado que el balance a esta escala pretende ser una aproximación al comportamiento hidrológico básico de las variables involucradas.



Figura 4.34.- Resultados de escorrentías simuladas contra escurrimientos aforados para la segunda evaluación del código.

Habiendo realizado las modificaciones al código y a la capa de retención de humedad del suelo, fueron ejecutadas las simulaciones para los 8 años de referencia y comparados con los registros históricos. Nuevamente puede observarse que los valores simulados son superiores a los medidos, aunque esto debe analizarse desde las características del territorio y la simplificación que hace el método, pues los valores simulados de escorrentías son los resultados de realizar el balance hidrológico celda por celda, y hacer una sumatoria simple, lo que significa asumir hay libre tránsito hacia la boquilla de la subcuenca. Suposición que no se cumple en todos los casos debido a las obras hidráulicas presentes en ésta, como lo es una cantidad considerable de pequeñas obras de retención (jagueyes y pequeñas represas) hasta presas de mayor tamaño, como es el caso de la presa de Atlangatepec al norte del estado, o la Laguna de Acuitlapilco al centro de la entidad. De

esta manera es que sin suponer que todos los escurrimientos simulados de un mes deben de verse reflejados en el aforo de la estación hidrométrica, se consideró que el código se adaptó de manera adecuada a las características específicas del territorio y se reconoce que los resultados obtenidos no pretenden ser exactos sino más bien un indicativo de la respuesta bajo cambio climático contra la línea base.

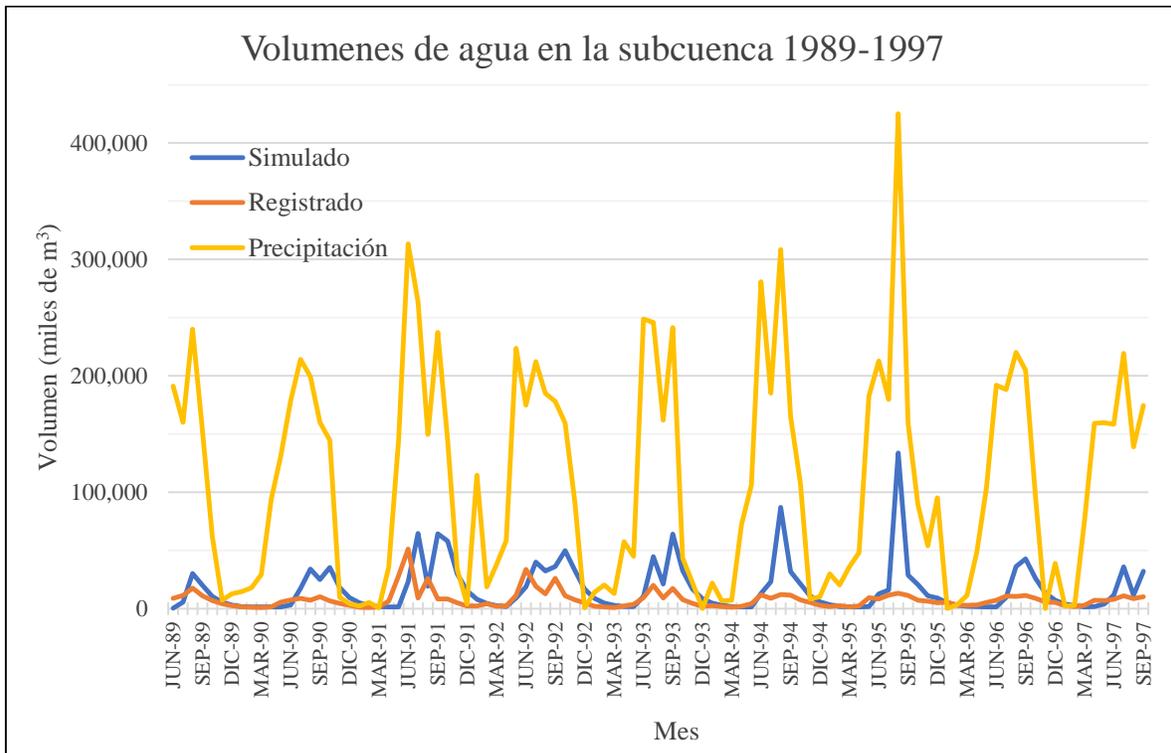


Figura 4.35.- Comportamiento de las escorrentías simuladas y escurrimientos aforados en respuesta a la precipitación total en la subcuenca.

En la Figura 4.35 se observa la relación entre los volúmenes totales precipitados en la subcuenca en cada mes, a lo largo del periodo de evaluación, así como el volumen de desagüe, producto de las simulaciones realizadas y de los valores aforados en la estación hidrométrica. Se aprecia que el comportamiento de los escurrimientos simulados es muy parecido al comportamiento de la precipitación, sobre todo en los meses de mayor intensidad; mientras que la respuesta en los registros aforados no necesariamente obedece de la misma manera durante periodos con precipitación similar. También debe resaltarse que durante el periodo seco del año los valores de escorrentía simulada son similares a los escurrimientos aforados, lo cual puede

asumirse como el caudal base del río Zahuapan, por lo cual la abstracción que realiza el modelo en este fenómeno es adecuada.

4.6.2. Balance hidrológico del estado base

Uno de los principales objetivos del proyecto es obtener un balance hídrico para la subcuenca, que pueda ser considerado como “estado actual”. En este punto debe de reconocerse que la escasez de información climatológica reciente representó el mayor problema para este propósito, ya que todos los registros para las estaciones en el estado de Tlaxcala se interrumpieron en el año 2013, dejando fuera de los estadísticos 7 años hasta la actualidad. Por lo cual debe tenerse presente que el considerar los valores medios de las variables para el periodo 1984-2013 es la mejor aproximación a la formulación de normales climatológicas plausibles de ser consideradas el estándar del pasado reciente en la subcuenca.

Asumiendo que el código generado arroja resultados aceptables se procedió a realizar las simulaciones necesarias para conocer cuál es el estado actual de las variables hidrométricas dentro de la subcuenca. De esta manera es que se generó un estado de referencia mediante el cual puedan realizarse las comparativas hacia los diferentes escenarios de cambio climático plausibles de presentarse. Como se describió en el apartado de calibración del modelo, el balance hidrológico de un año debe de tener en consideración la condición de humedad en el suelo del último mes del año hidrológico anterior, por lo que en este caso se optó por realizar un año de entrenamiento alimentado con la misma información climatológica para la simulación del año de referencia.

4.6.2.1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

Para la generación de la capa de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para el estado actual, se empleó la Serie VI del Continuo Nacional de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI con año de referencia 2014, y fecha de obtención de información de campo 2015. Se consideró que, dados los propósitos exploratorios del proyecto, ésta permite satisfacer la construcción de un estado base capaz de compararse de manera efectiva con los escenarios a evaluarse.

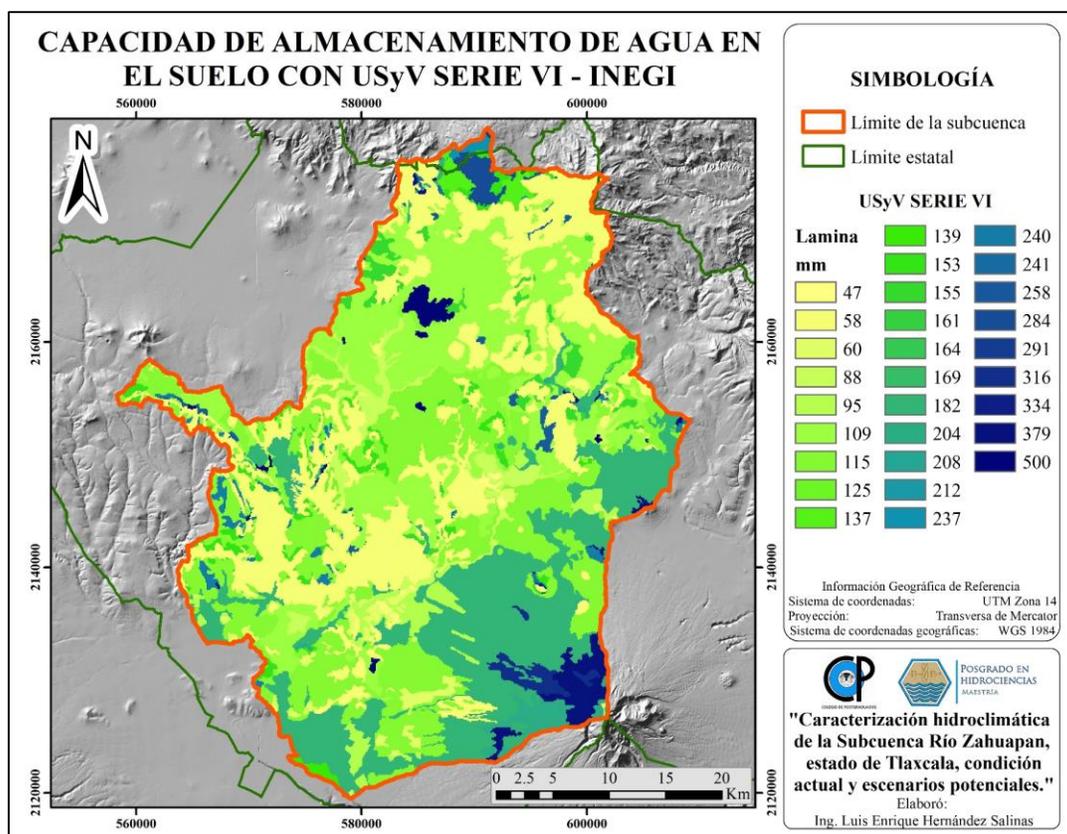


Figura 4.36.- Distribución de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo; Serie VI - INEGI.

Por su parte, los valores edáficos fueron conservados en su totalidad, pues estas características no deben de alterarse de manera significativa en el intervalo 1987-2017 que supone los periodos de evaluación. Las profundidades radiculares de cada cobertura vegetal fueron las mismas empleadas posterior al proceso de calibración, siendo de esta manera realizada la operación en la calculadora de campos de la tabla de atributos para posteriormente exportar la capa en archivo tipo *raster* con las características de formato necesarias para ser importada en MATLAB.

4.6.2.2. Precipitación media mensual

Para la creación de las imágenes mensuales de distribución de precipitación acumulada se procesaron los registros de la climatología histórica de las 20 estaciones bajo análisis, de manera inicial se extrajeron desde las bases de datos los registros correspondientes al periodo 1984-2013, ya que en todas las estaciones en el territorio tlaxcalteca se disponen de registros solo hasta el año

2013 y se buscó cumplir como el periodo mínimo de años (30) para obtener un promedio histórico representativo capaz de ser considerado una normal climatológica del pasado reciente. Pues como se describe en el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático para el Estado de Tlaxcala (Universidad Autónoma de Tlaxcala, 2014) las observaciones de los últimos 42 años para el estado muestran que la temperatura media anual en el periodo 1991-2012, se ha elevado 0.9°C en promedio, en relación con el periodo 1971-1990, siendo la media histórica del período (1971-2012) de 14.1°C demostrando que las observaciones están por arriba de la media histórica después de 1991. Con lo que se descarta el emplear un promedio histórico que considere todos los registros realizados por cada estación existiendo registros desde 1940 en algunas estaciones por el sesgo que pudieran representar en el comportamiento real en las últimas décadas.

Posterior a acotar el periodo de registros a ser considerados se procedió a hacer un control de calidad para eliminar valores extremos, cuya diferencia con el promedio fuera mayor que dos veces la desviación estándar (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2014). A continuación, se construyó una tabla donde se concentraron los promedios para cada mes en cada estación, para después ser importada a ArcMap y procesada mes a mes mediante interpolación por el método de la distancia inversa ponderada (IDW). De esta manera se obtuvieron las 12 imágenes correspondientes a cada mes del año, las cuales se consideraron como la normal climatológica para el estado actual de la subcuenca.

4.6.2.3. Temperatura media mensual

Debido a que el CCA pone a disposición mapas de reanálisis mensual de las temperaturas máxima y mínima mensual para el periodo 1979-2009, se posee información ya validada para los años 1984-2009 del mismo periodo de referencia que se pretende considerar, a partir de los mapas nacionales de las temperaturas extremas se realizaron los procesos necesarios para recortar la imagen a los límites de la subcuenca, realizar una proyección geográfica de la misma y re-escalar las imágenes a una resolución de pixel coincidente con el resto de capas.

Por su parte, la información espacial de los 4 años restantes fue procesada mediante la obtención de la climatología histórica de las 20 estaciones en la zona de estudio, desde las bases de datos oficiales fueron extraídos los valores de temperatura máxima y mínima mensual para cada estación durante el intervalo 2010-2013. Dichos valores fueron promediados para cada mes en su

respectiva estación y siguiendo lo descrito en Ortiz (1987) y Gómez *et al.* (2008) se elaboraron modelos de regresión lineal considerando la altitud sobre el nivel del mar en la cual se encuentra cada estación, algunas estaciones debieron ignorarse para obtener coeficientes de determinación (r^2) superiores a 0.8 para ser considerados modelos aceptables y que permitieran explicar el gradiente térmico en función de la elevación. Con cada uno de los 24 modelos de regresión lineal se realizaron las operaciones en *raster calculator* de ArcMap procesando el MDE dentro de la subcuenca, obteniéndose de esta manera la distribución espacial de las temperaturas extremas en formatos *raster* con una resolución espacial de 15 metros por celda, característica original del MDE, y realizándose un último proceso de re-escalado por método del vecino más cercano para homogenizar la referencia espacial de los archivos, así como la extensión y el tamaño de celda de las imágenes.

Cuadro 4.30.- Modelos de regresión lineal correspondientes al gradiente térmico por altitud en la subcuenca para el periodo 2010-2013.

Mes	Modelos de regresión lineal generados	
	Temperatura máxima	Temperatura mínima
Enero	$y = -0.0109x + 48.609$	$y = -0.0074x + 20.735$
Febrero	$y = -0.0062x + 36.61$	$y = -0.0083x + 24.646$
Marzo	$y = -0.0104x + 48.117$	$y = -0.0082x + 24.167$
Abril	$y = -0.0139x + 57.723$	$y = -0.0083x + 26.992$
Mayo	$y = -0.0068x + 42.698$	$y = -0.0067x + 24.747$
Junio	$y = -0.0061x + 38.728$	$y = -0.0103x + 33.972$
Julio	$y = -0.0059x + 36.58$	$y = -0.0105x + 34.682$
Agosto	$y = -0.0056x + 36.264$	$y = -0.0088x + 30.479$
Septiembre	$y = -0.0072x + 39.244$	$y = -0.0111x + 36.031$
Octubre	$y = -0.0079x + 41.85$	$y = -0.0072x + 23.926$
Noviembre	$y = -0.0071x + 39.387$	$y = -0.0071x + 22.124$
Diciembre	$y = -0.0105x + 46.248$	$y = -0.0078x + 20.93$

Finalmente, mediante la herramienta *Cell Statistics* se obtuvo para cada celda el promedio de temperatura máxima y mínima en su mes respectivo durante los 30 años de información, con ello se obtuvo una imagen de temperatura máxima y otra de temperatura mínima para cada mes, que serían promediadas posteriormente para obtener la temperatura media de cada mes del año a ser considerado de referencia.

4.6.2.4. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial para el año de referencia a ser considerado como el estado actual fue estimada mediante el método de Thornthwaite (1948) a partir de las imágenes de temperatura media mensual descritas en el apartado anterior. Los archivos finales fueron configurados al formato a emplearse en la rutina de MATLAB.

4.6.2.5. Ejecución del balance hídrico

Habiendo generado las imágenes necesarias para la ejecución de la rutina del balance hidrológico se procedió a emplear el código que anteriormente fue calibrado y validado, realizando en primer lugar la rutina para el año de entrenamiento y posteriormente considerando los resultados necesarios de septiembre para continuar con la simulación del balance del año que se consideró como estado actual de la subcuenca. Las imágenes obtenidas fueron georreferenciadas para poder ser desplegadas sobre la zona de estudio para su análisis.

4.6.3. Uso de escenarios de cambio climático

Dado que se trata de un estudio exploratorio del impacto del cambio climático en la subcuenca, se acotó la generación de escenarios a los 3 MCG propuestos, bajo RCP4.5 y RCP8.5, ya que son las más comunes de contemplar en este tipo de trabajos, al corresponder a un escenario de concentración de gases de efecto invernadero conservador y al más severo, respectivamente, y hacia los horizontes cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099).

4.6.3.1. Precipitación media mensual

El CCA de la UNAM ha generado mapas de la climatología a esperarse bajo escenarios de cambio climático a partir de la integración de la anomalía esperada por distintos MCG sobre los mapas de climatología base 1961-2000 para el territorio nacional, a partir de estos recursos ya publicados, se procedió a extraer la información contenida en la superficie de la subcuenca y a adecuarla a la resolución espacial y características de formato de imagen para ser procesadas en MATLAB. De esta manera se obtuvieron 144 imágenes mensuales a ser empleadas en el proceso de simulación del balance hídrico, que si bien son necesarias para el proceso de cálculos numéricos también representan el procesamiento de la información de estos escenarios para la subcuenca permitiendo una consulta más sencilla para quien esté interesado en conocer el comportamiento

de la variable bajo determinadas condiciones por presentarse al presentarse las principales diferencias promedio con respecto al estado base para cada escenario climático evaluado, los mapas que sintetizan esta información se presentan en el Anexo C.

4.6.3.2. Temperatura media mensual

Al igual que con los archivos de precipitación mensual acumulada a esperarse en la subcuenca bajo escenarios de cambio climático, se realizó la descarga y procesamiento de las imágenes disponibles en el portal oficial de UNIATMOS respectivas a la temperatura media mensual, las cuales son producto del mismo proceso de adición de la anomalía por escenario sobre los valores de la climatología base 19961-2000 para el territorio nacional.

4.6.3.3. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial mensual acumulada fue estimada de la misma manera que se ha realizado con anterioridad a partir de la temperatura media mensual de cada escenario de cambio climático.

4.6.3.4. Ejecución del balance hídrico

Finalmente, se realizó la simulación de cada uno de los 12 escenarios de cambio climático a evaluarse, al igual que con la simulación del estado actual se ejecutó un año de entrenamiento y posteriormente los resultados de la segunda simulación son considerados como los respectivos al escenario en cuestión.

Se elaboró un código adicional en MATLAB que eficientizó la suma de los valores presentes en cada imagen mensual para la obtención de volúmenes totales en la subcuenca, para las distintas variables. Con el propósito de realizar un análisis del impacto generalizado en cada variable hídrica mes a mes con respecto al estado base.

4.7. Clasificación climática por índice de humedad de Thornthwaite

El empleo de las coberturas espaciales de la precipitación anual y de la evapotranspiración potencial permitieron realizar la distribución de los tipos climáticos presentes en la subcuenca, de acuerdo con la clasificación propuesta por Thornthwaite en 1948 con base en el Índice de Humedad (IHT), la clasificación de los tipos climáticos queda definida en el Cuadro 4.31. Originalmente el

índice de humedad fue propuesto por Thornthwaite para realizar una clasificación climática más racional, que considerara las relaciones entre la vegetación y las variables climáticas, al emplear las cantidades anuales del déficit y exceso de humedad. Posterior a realizar el balance hídrico es posible estimar los índices de aridez y de humedad, respectivamente.

La fórmula que expresaba originalmente dicho índice (TMI, por sus siglas Thornthwaite Moisture Index) es:

$$TMI = \frac{(EXC - 0.6DEF)}{ETP} \quad (4.32)$$

Donde:

TMI = índice de humedad de Thornthwaite (adimensional)

EXC = valor anual del exceso de humedad (mm)

DEF = valor anual del déficit de humedad (mm)

ETP = valor anual de la evapotranspiración potencial (mm)

Desde entonces varios autores han realizado modificaciones a dicha ecuación con el propósito de volverla más fácil de implementar y de obtener una mejor clasificación de los tipos climáticos. En el presente trabajo se hizo uso de la propuesta por Witczak *et al.* (2006), y empleada por Olaiz *et al.* (2018) y Saha *et al.* (2019), quienes obtuvieron resultados sumamente cercanos a los propuestos en la metodología original al emplear su fórmula, la cual solo considera la precipitación y evapotranspiración potencial anual:

$$TMI = 75 * \left(\frac{PP}{ETP} - 1 \right) + 10 \quad (4.33)$$

Donde:

TMI = índice de humedad de Thornthwaite (adimensional)

PP = valor anual de la precipitación (mm)

ETP = valor anual de la evapotranspiración potencial (mm)

Cuadro 4.31.- Clasificación climática de Thornthwaite por Índice de Humedad.
Fuente: Thornthwaite, 1948.

Clave	Descripción	TMI
A	Per-Húmedo	> 100
B ₄	Húmedo	80 - 100
B ₃	Húmedo	60 - 80
B ₂	Húmedo	40 - 60
B ₁	Húmedo	20 - 40
C ₁	Subhúmedo Húmedo	0 - 20
C ₂	Subhúmedo Seco	-20 - 0
D	Semi Árido	-40 - -20
E	Árido	-60 - -40

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La delimitación de la subcuenca realizada permite demostrar una de las principales problemáticas del manejo de cuencas hidrográficas, pues aun siendo estas las unidades de manejo ambiental por excelencia debido a las relaciones internas de todas las variables ecológicas, las divisiones administrativas de las entidades y municipios dificultan el establecimiento de acciones y programas de manejo capaces de ser desarrollados en el tiempo de manera efectiva.

Un punto a ser considerado en la validación del modelo fue el que al realizar la simulación del balance hidrológico para el estado base (periodo de referencia 1984-2013), el volumen de agua que se asume se convierte en percolación durante el año, fue de 77.77 hm³ lo cual es cuando menos aproximado a los 56.9 hm³ estimados como recarga vertical directa en la Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Alto Atoyac (2901), Estado de Tlaxcala, publicada en diciembre de 2020, dicho acuífero comparte casi la misma distribución espacial que la subcuenca bajo estudio la cual cubre el 81% de la superficie de este.

Debido a la revisión de literatura sobre el empleo del método se puede concluir que los volúmenes obtenidos para el concepto de desagüe pueden comprender distintos tipos de abstracciones hidrológicas, aunque de manera usual estos son considerados escurrimientos superficiales, nuevamente recuperando los trabajos de del Toro-Guerrero *et al.* (2014) y Rodríguez *et al.* (2019) es posible considerar que el agua excedente puede convertirse de igual manera en flujos subterráneos que finalmente emergen en los cauces perennes formando así el caudal base o

continuar sus movimientos dada la configuración del subsuelo. Para el caso de la subcuenca del río Zahuapan, la cual se encuentra sobre un acuífero libre cuyos materiales suelen tener un origen sedimentario, no es difícil imaginar que los excedentes de agua puedan convertirse en flujos subterráneos en buena parte, además de los superficiales que convergen en los cauces y cuerpos de agua.

Si consideramos que el total de agua que es aprovechada para riego y que es derivada de cauces y cuerpos de agua superficiales, y que no se ve reflejada como escurrimiento en la boquilla de la presa, fue un promedio de 23 hm³ anuales en el periodo 2016-2019 para el Distrito de Riego 056 según CONAGUA, aunque la Actualización de la Disponibilidad de Agua en el acuífero Alto Atoyac, Estado de Tlaxcala 2020 considera un volumen de 26 hm³ de agua superficial para el mismo Distrito de Riego. Al restar dicho valor al total de escorrentía anual en cada uno de los años simulados para el periodo de calibración, suponiendo un comportamiento similar, se obtendría en teoría el volumen libre de convertirse en escurrimientos superficiales y subterráneos.

De esta manera es que la diferencia entre el volumen reportado como escurrimiento en la boquilla y la escorrentía simulada por el método del balance hídrico climático podría considerarse como el volumen de agua que fluye de manera subterránea, el promedio de dicha abstracción en el periodo 1988-1997 fue de 189.03 hm³, lo cual vuelve a ser similar a lo reportado en la Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Alto Atoyac donde se estimó un volumen de 130.00 hm³ como flujos subterráneos horizontales hacia el acuífero. Si bien estos valores que han sido comparados no son exactos, permiten asumir que el método representa una aproximación a la dinámica de la subcuenca, aunque robusta, la similitud permitirá considerar los resultados de la evaluación de escenarios de cambio climático en la subcuenca como un primer acercamiento a conocer las tendencias de impacto de los mismos en el balance hídrico.

5.1. Cambio de uso de suelo histórico en la subcuenca

Las estadísticas sobre cómo los recursos naturales y los servicios ambientales son transformadas por la actividad del hombre pueden ser indicadores útiles de advertencia del deterioro ambiental y pueden dar una idea de cómo intervenir para un manejo sustentable de los mismos, en ese sentido, el análisis y proyección del cambio del uso y cubierta del suelo provee una herramienta que permite asegurar cambios al ecosistema, así como sus implicaciones

ambientales. Leyva y Herrera (2003) concluyen que: a pesar de ser altamente significativas las relaciones entre la dinámica sociodemográfica y la dinámica territorial, esas relaciones son cambiantes en el tiempo. Lo cual es un indicador que, a escala nacional, tanto la dinámica territorial como la dinámica poblacional son fenómenos paralelos que están respondiendo de manera similar a las transformaciones que se están dando en otros sectores, principalmente en el sector económico y tecnológico.

Mediante el procesado de las coberturas nacionales de Uso de Suelo y Vegetación Series II – VI Continuo Nacional de INEGI se realizó el análisis del cambio de uso de suelo en la cuenca entre los años 1985 y 2017. El comportamiento se presenta en el Cuadro 5.1, mientras que el Cuadro 5.2 condensa los extremos observados para el intervalo descrito y por grupos generalizados de cobertura vegetal y uso de la tierra.

Cuadro 5.1 Comportamiento específico del cambio de superficie entre las distintas series de USyV de INEGI.

Clave	Uso de Suelo y Vegetación Descripción	Superficie (ha)					Cambio SII - SVI
		Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V	Serie VI	
VSa/BQP	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	187.9	1,056.10	1,049.50	1,049.50	1,049.50	458.40%
AH	Asentamientos humanos	-	324.4	899.1	1,438.80	1,438.80	343.50%
VT	Tular	38.5	38.5	38.5	59.6	59.6	54.80%
BA	Bosque de oyamel	236.7	296.9	296.9	296.9	296.9	25.50%
TA	Agricultura de temporal anual	79,445.30	85,448.40	91,079.20	90,453.10	90,453.10	13.90%
H2O	Cuerpo de agua	1,174.40	1,166.20	1,220.60	1,220.60	1,220.60	3.90%
VSa/BPQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino- encino	233.8	237.5	237.5	237.5	237.5	1.60%
BC	Bosque cultivado	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	0.00%
DV	Sin vegetación aparente	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	0.00%
RP	Agricultura de riego permanente	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	0.00%
RS	Agricultura de riego semipermanente	187.3	187.3	187.3	187.3	187.3	0.00%
VSA/BP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	-	551.7	551.7	551.7	551.7	0.00%
VW	Pradera de alta montana	172.2	172.2	172.2	172.2	172.2	0.00%
RAS	Agricultura de riego anual y semipermanente	7,544.70	7,565.80	7,437.60	7,437.60	7,437.60	-1.40%
ZU	Zona urbana	1,675.60	1,640.40	1,640.40	1,640.40	1,640.40	-2.10%
BPQ	Bosque de pino-encino	291.9	283.6	283.6	283.6	283.6	-2.90%
VSa/BP	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	2,533.10	2,368.10	2,368.10	2,368.10	2,368.10	-6.50%
TP	Agricultura de temporal permanente	55.8	51.9	51.9	51.9	51.9	-7.00%
RA	Agricultura de riego anual	6,246.20	5,782.20	5,782.10	5,782.20	5,782.10	-7.40%
BQ	Bosque de encino	2,842.70	2,571.30	2,568.60	2,568.60	2,568.60	-9.60%
VSa/BJ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	6,179.60	5,278.90	5,278.40	5,584.00	5,584.00	-9.60%
BP	Bosque de pino	6,995.70	6,044.90	6,019.40	6,019.40	6,019.40	-14.00%
BJ	Bosque de táscate	2,537.00	2,212.90	2,248.60	2,047.90	2,047.90	-19.30%
TAP	Agricultura de temporal anual y permanente	21,492.00	23,158.60	17,155.00	17,155.00	17,155.00	-20.20%
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	3,087.10	2,391.40	2,391.40	2,391.40	2,391.40	-22.50%
PI	Pastizal inducido	18,439.80	13,898.60	13,770.00	13,730.60	13,730.60	-25.50%
BQP	Bosque de encino-pino	1,906.90	999	999	999	999	-47.60%
VSh/BJ	Vegetación secundaria herbácea de bosque de táscate	68.8	4.8	4.8	4.8	4.8	-93.10%
PH	Pastizal halófilo	62.3	-	-	-	-	-100.00%

Uso de Suelo y Vegetación		Superficie (ha)					Cambio SII - SVI
Clave	Descripción	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V	Serie VI	
VSa/MC	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	96.2	-	-	-	-	-100.00%

Nota: Celdas con “-” indican que el atributo no se encontraba en la capa

Cuadro 5.2 Comportamiento General del Uso de Suelo y Vegetación en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.

Tipo de vegetación o uso de suelo	Superficie (ha)			Tasa de cambio
	Serie II	Serie VI	Cambio	
Asentamientos humanos	1,675.55	3,079.15	1,403.60	83.80%
Tular	38.52	59.61	21.1	54.80%
Agricultura de temporal	100,993.08	107,659.97	6,666.90	6.60%
Cuerpo de agua	1,174.36	1,220.64	46.3	3.90%
Pradera de alta montaña	172.15	172.15	0	0.00%
Sin vegetación aparente	15.39	15.39	0	0.00%
Vegetación secundaria	12,386.58	12,186.81	-199.8	-1.60%
Agricultura de riego	14,031.56	13,460.46	-571.1	-4.10%
Bosque de coníferas	7,532.87	6,608.49	-924.4	-12.30%
Bosque de táscate	2,537.01	2,047.88	-489.1	-19.30%
Bosque de encino	4,749.54	3,567.58	-1,182.00	-24.90%
Pastizal inducido	18,502.10	13,730.60	-4,771.50	-25.80%

El estado de Tlaxcala cuenta con una larga historia de procesos modificadores del entorno, desde la época prehispánica el incremento de la frontera agrícola causó la alteración de las coberturas vegetales originales, las cuales de acuerdo a Rzedowski (1990) son en su mayoría de bosque de encino en los valles y de bosque de coníferas en las sierras y montañas, con una particular distribución de vegetación acuática y semiacuática en las llanuras de inundación del suroeste de la subcuenca. Sin embargo, gracias a este análisis, es posible observar que desde la década de los 80's las superficies que aún conservaban vegetación superior dentro de la subcuenca del río Zahuapan, dieron lugar a nuevas tierras agrícolas y a asentamientos humanos. La predominancia de superficies agrícolas desde hace siglos pone de manifiesto el impacto de la actividad productiva en la modificación del paisaje. Lo cual es consecuencia de una dinámica de crecimiento demográfico en la región, donde se prevé que de continuar los mismos procesos pueda

tenerse una reducción del 14.8 % de los bosques actuales hacía el 2030 (Cortez-Yacila y Rojas-Contreras, 2021).

5.2. Impacto del cambio de uso de suelo sobre la capacidad de retención de humedad

Como producto secundario de la necesidad de generar las imágenes de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para la subcuenca para dos periodos de evaluación, es posible evaluar de igual manera los cambios que se presentaron en esta característica en un lapso de casi 3 décadas. Como fue descrito en el apartado anterior, para la subcuenca se presentaron fenómenos de cambio de uso de suelo sobre todo en la conversión de coberturas vegetales a tierras de uso agrícola, pero también del incremento de las zonas urbanas sobre áreas de producción.

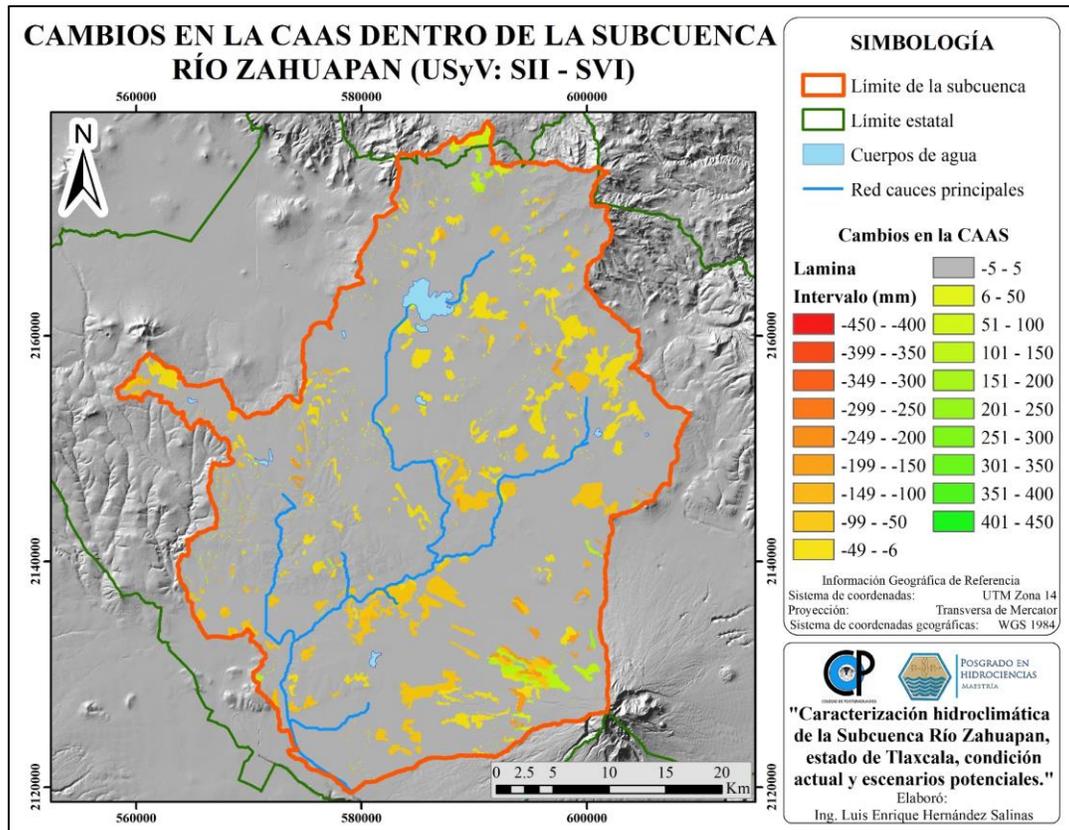


Figura 5.1.- Modificaciones en la Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo entre las Series II y VI de INEGI.

Mediante una superposición de imágenes y la obtención de la diferencia de los valores de la matriz generada con la información de la Serie VI respecto a la capa obtenida al emplear la Serie II es posible identificar las zonas y la proporción donde se presenta cambios, ya sean negativos o positivos, en la capacidad de retención de humedad, lo cual se presenta en la Figura 5.1.

De manera cuantitativa, a partir de la extracción de los valores en cada celda que manifestó un cambio y despreciando aquellas modificaciones menores a 5 mm, un total de 19,623 ha de la subcuenca presentó una alteración en su capacidad de retención de agua, de las cuales puede precisarse que 2,526 ha presentan una ganancia, que, si bien es en distintos rangos, esta representa un volumen de 2.87 hm³, mientras que 17,097 ha muestran pérdidas que ascienden a un total de 10.91 hm³. Lo anterior pone en evidencia el impacto del cambio de uso de suelo, sobre todo del incremento de la frontera agrícola sobre superficies forestales y de vegetación originaria, sobre la capacidad de retención de humedad por parte del suelo siendo en el caso de la subcuenca una condición de pérdida potencial de 8.04 hm³ de agua a ser retenida por los suelos.

5.3. Estado hidrológico actual de la subcuenca

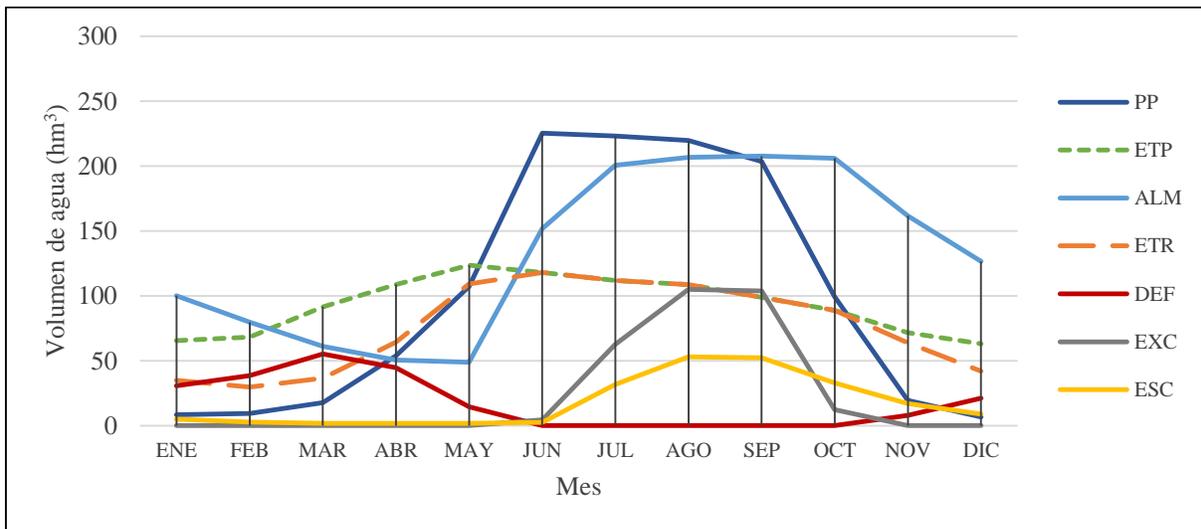


Figura 5.2.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el periodo de referencia 1984-2013.

La Figura 5.2 muestra el balance hídrico a ser considerado la línea base para la subcuenca, mientras que Figura 5.3 muestra la clasificación climática del área de estudio considerando los

valores climatológicos del estado de referencia 1984-2013. Se observa que en la subcuenca domina la condición subhúmedo húmedo, al igual que una distribución considerable de los tipos húmedos B₁ y B₂ que obedecen a los cambios en la orografía sobre el volcán La Malinche y la región accidentada del oeste de la subcuenca, en una menor fracción se haya una zona subhúmeda seca que coincide con la distribución de condiciones propias de la región oriente del estado de Tlaxcala.

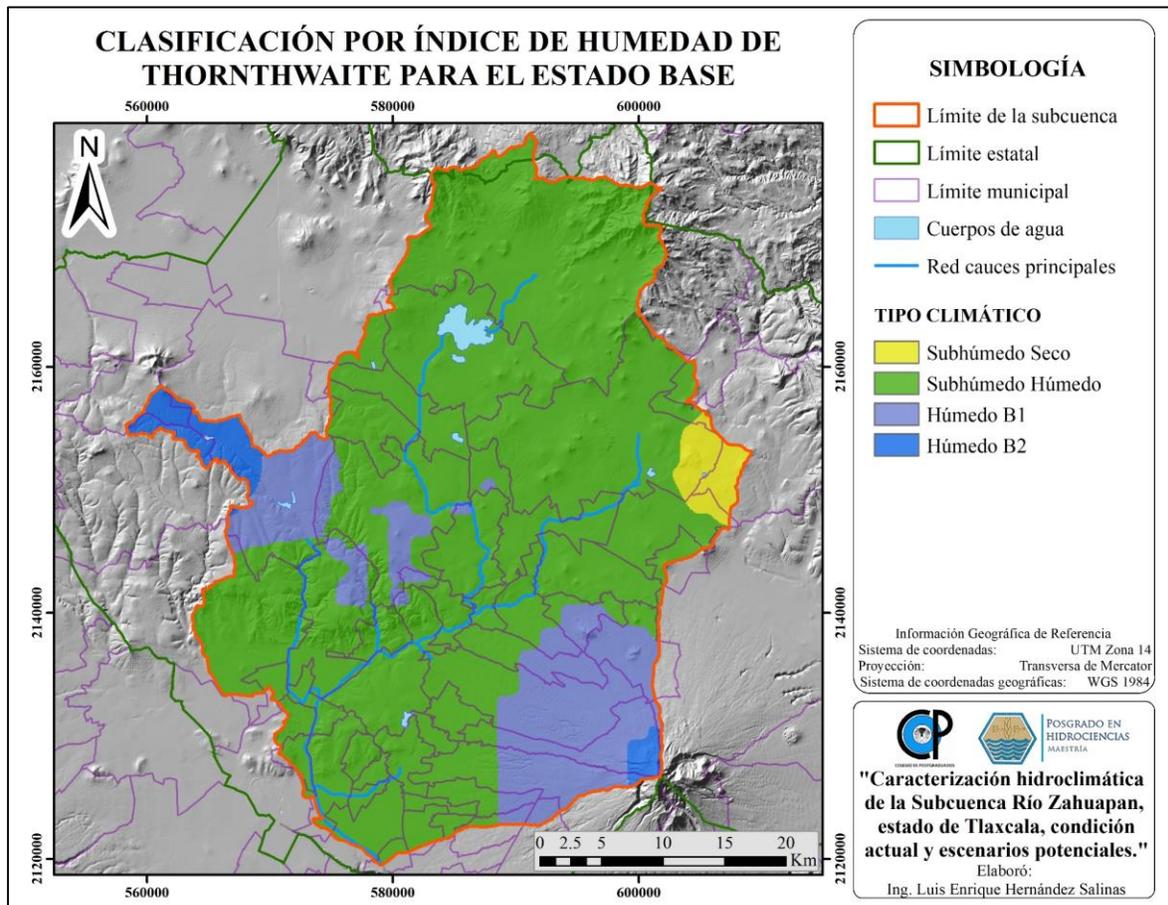


Figura 5.3.- Distribución de climas por índice de humedad para el estado base.

5.4. Balances bajo escenarios de cambio climático

Mediante las mismas consideraciones para la ejecución del balance hidrológico del año base, fueron evaluados los 12 escenarios de cambio climático. Una de las principales ventajas en la adopción de este método para el estudio de la subcuenca fue la capacidad de detallar el balance hidrológico a una escala considerablemente pequeña, pues la unidad espacial mínima de

procesamiento fue una hectárea. Esto quiere decir que se puede observar el comportamiento espacial de las anomalías climatológicas posibles de presentarse y lograr la identificación puntual de zonas de mayores afectaciones que puedan ser susceptibles de mayor atención y del desarrollo de acciones de adaptación y mitigación de dichos efectos del cambio climático.

De esta manera es que se generó un acervo de imágenes considerable, pues se contó con 11 variables involucradas en el cálculo del balance, con 12 meses por año hidrológico y 12 escenarios, lo cual implica la generación de 1584 matrices/imágenes que pueden ser analizadas de manera específica dependiendo del objetivo e interés particular; sin embargo, considerando que el objetivo principal es identificar comportamientos generales para la subcuenca, se realizó la sumatoria de los volúmenes totales de agua para cada componente del balance hídrico en cada mes para graficarlos en su conjunto y observar su respuesta.

Derivado del análisis de los balances realizados para el escenario de emisiones RCP4.5 en el horizonte cercano, se observa que presentan un comportamiento similar, salvo la presencia de una sequía intraestival en el mes de julio para los MCG GFDL y HADGEM, siendo para el primero de mayor intensidad, mientras que en el MCG MPI la inexistencia de dicho fenómeno repercute en un curva de mayor intensidad en los excesos producidos por la subcuenca, con un pico superior a los 100 hm³ en el mes de agosto, lo cual se haya muy por encima de los otros dos modelos.

De la misma manera que para el estado base se realizó la clasificación de los tipos climáticos con base en el IHT presentes en la subcuenca, para cada combinación de escenario RCP y horizonte temporal se obtuvieron los valores promedio considerando los tres modelos de circulación empleados para la precipitación y evapotranspiración potencial esperadas. Si bien proceder de esta manera considera un sesgo ya que los valores precisos de cada variable pueden ser superiores en un determinado MCG, se asume que un promedio de los tres bajo observación permite obtener un comportamiento dominante atenuando las discrepancias entre los distintos recursos. Considerando esta misma generación de promedios simples de los resultados obtenidos en cada escenario, es que en el Anexo C se presentan mapas que muestran las diferencias promedio entre el estado base y la media obtenida de los tres MCG para los meses en los que se manifiestan los excesos de humedad y déficit de agua para cada escenario de emisiones y horizonte temporal.

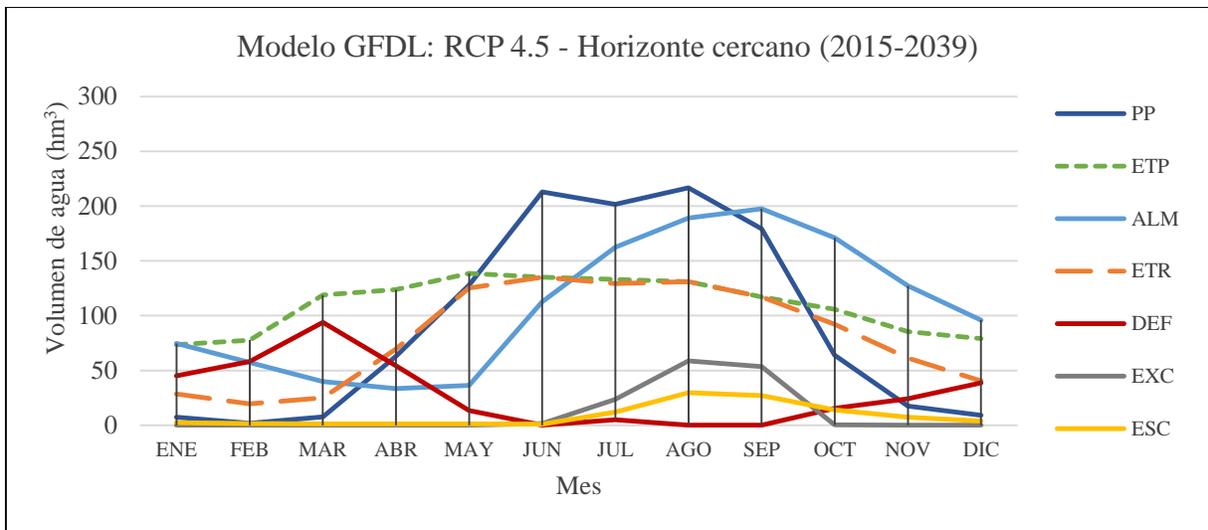


Figura 5.4.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo GFDL.

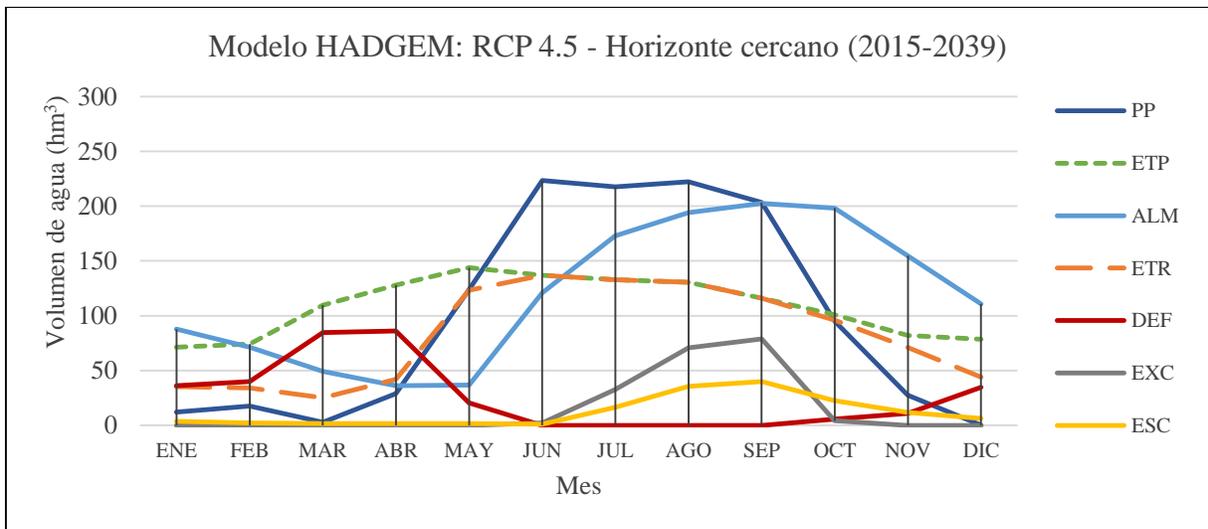


Figura 5.5.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo HADGEM.

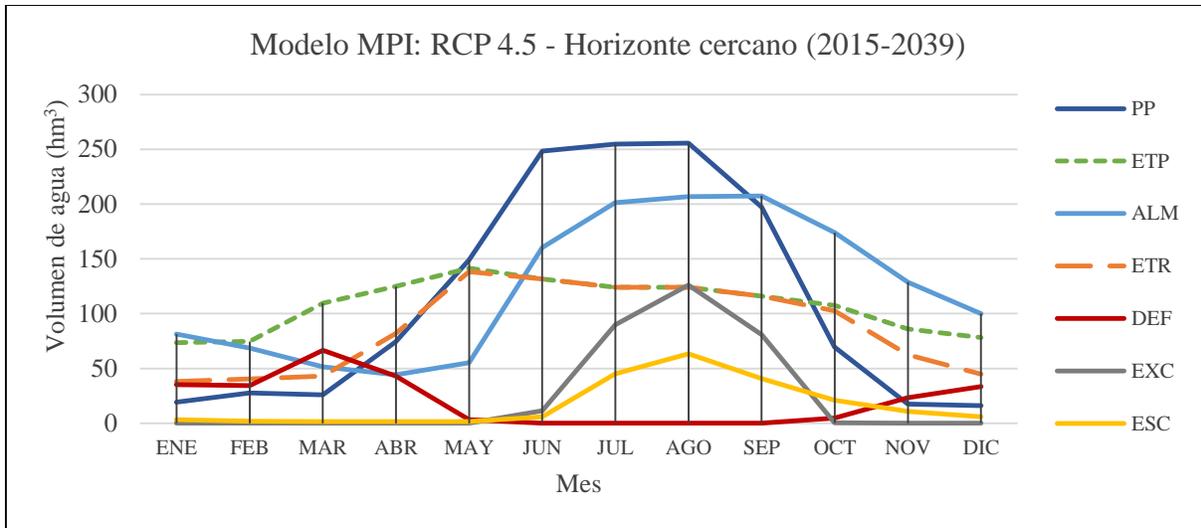


Figura 5.6.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo MPI.

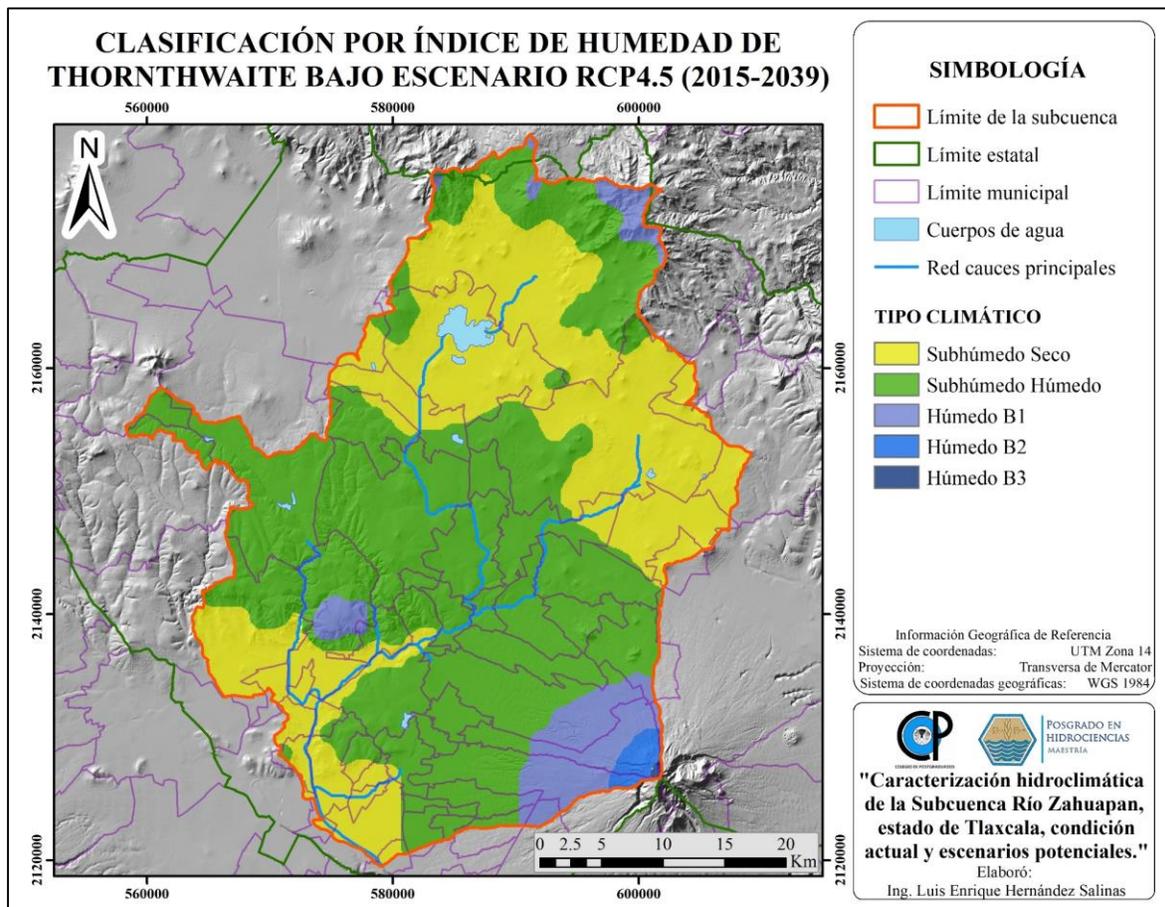


Figura 5.7.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2015-2039).

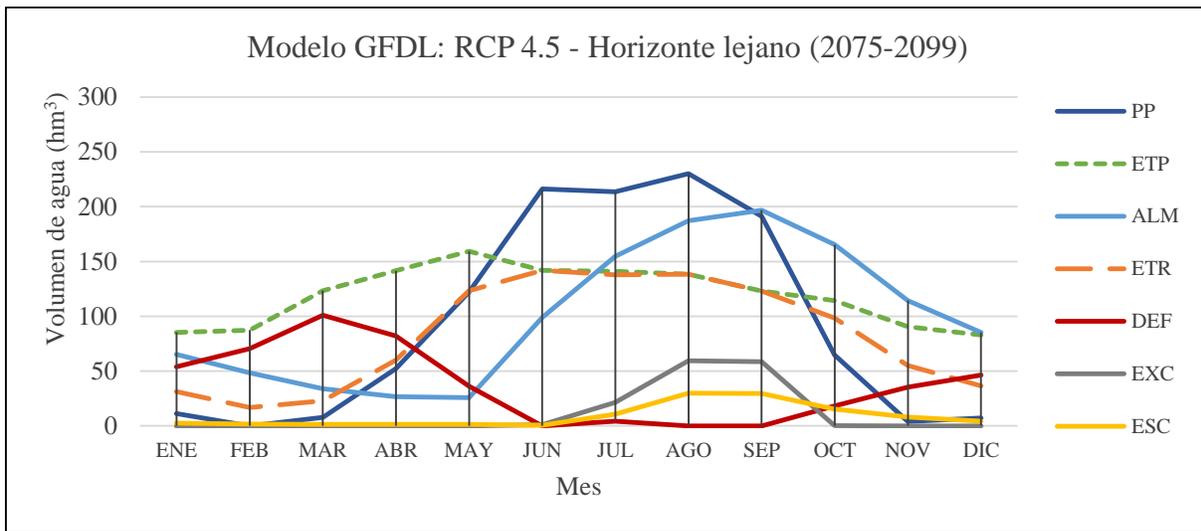


Figura 5.8.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo GFDL.

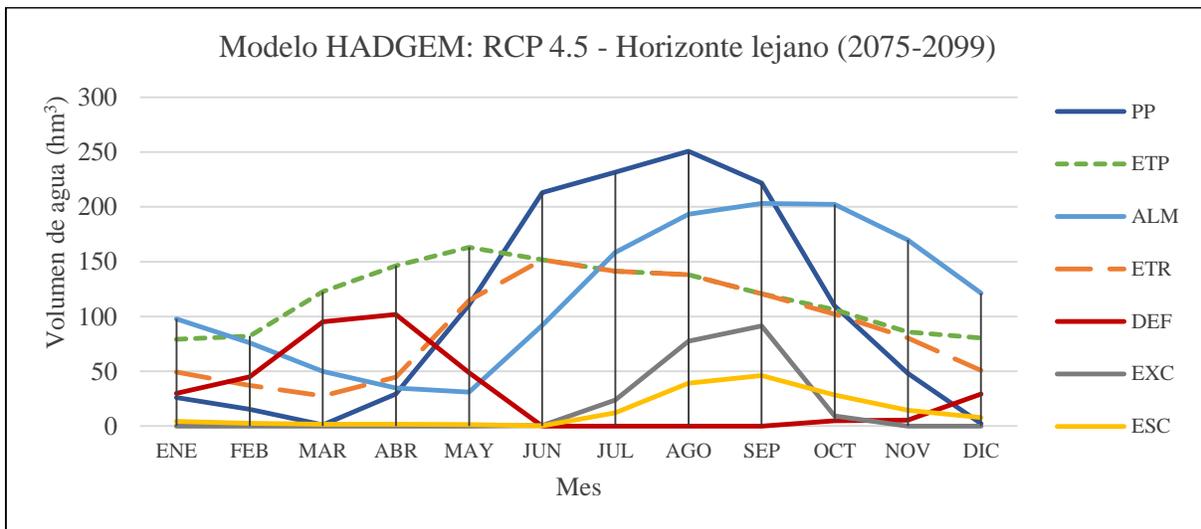


Figura 5.9.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo HADGEM.

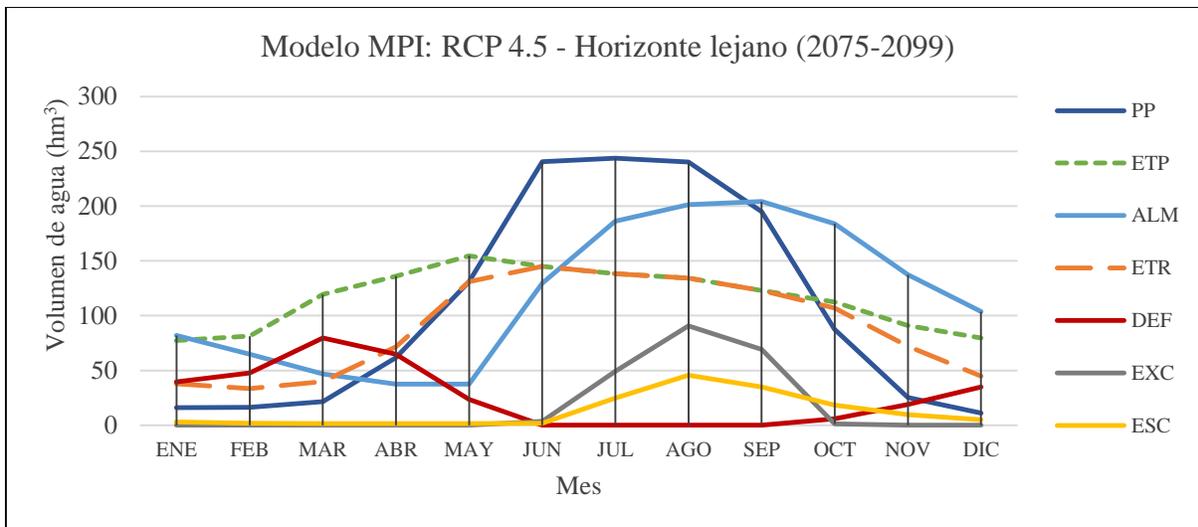


Figura 5.10.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP4.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo MPI.

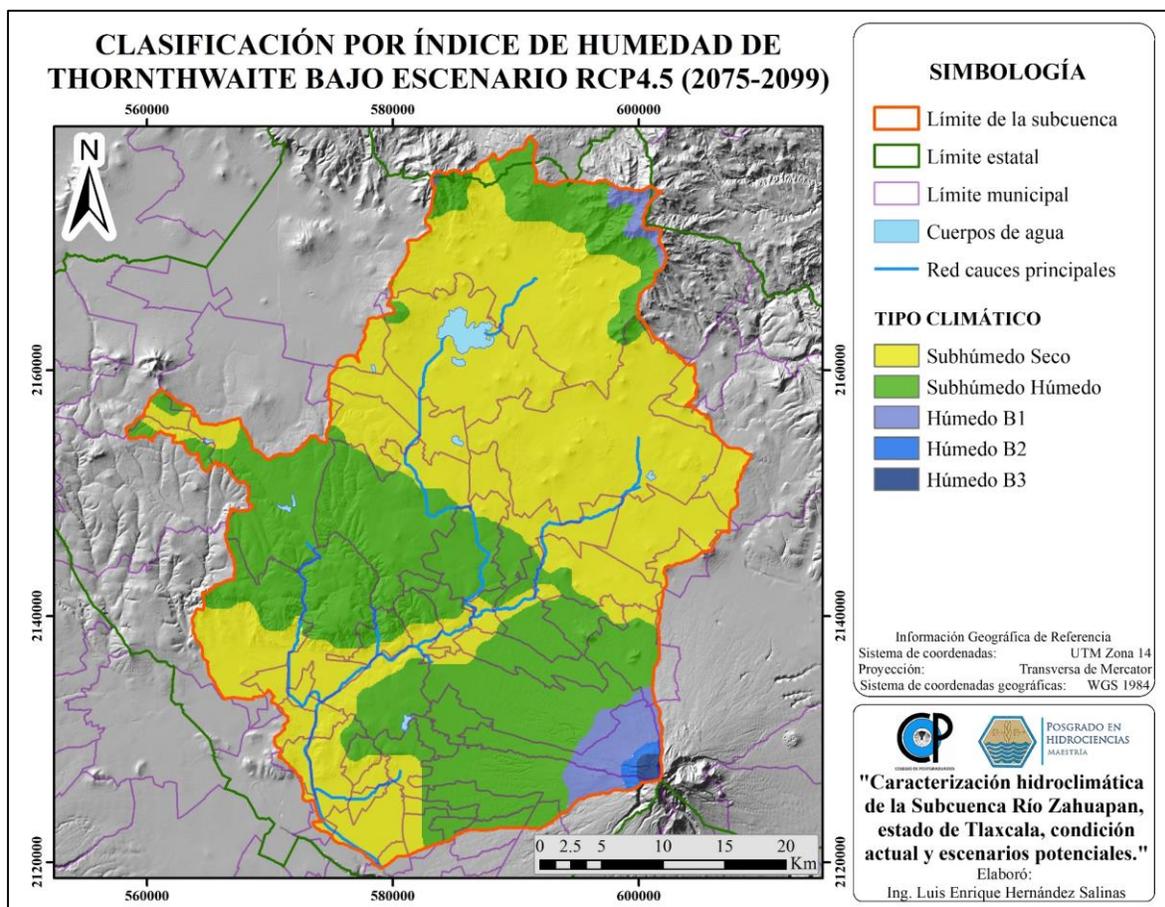


Figura 5.11.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2075-2099).

En la Figura 5.11 puede observarse que para el horizonte lejano el promedio de precipitaciones y evapotranspiración potencial para los tres modelos evaluados marcan una tendencia hacia el incremento en la distribución del clima subhúmedo seco, así como una reducción aún mayor de la cobertura de climas del tipo húmedo, aunque de manera curiosa la distribución de un clima húmedo B₃ gana terreno en la cima del volcán La Malinche.

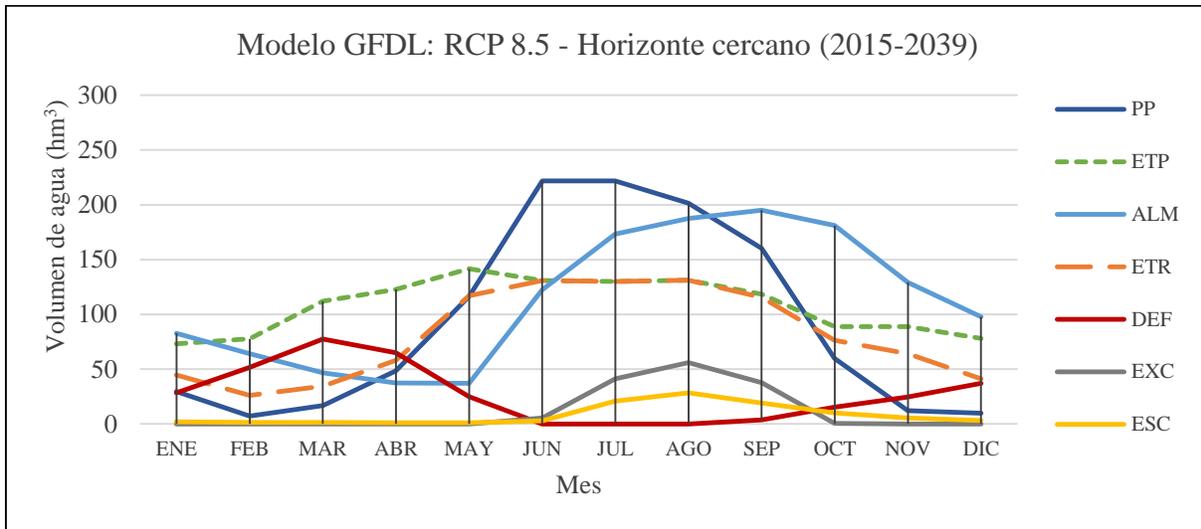


Figura 5.12.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo GFDL.

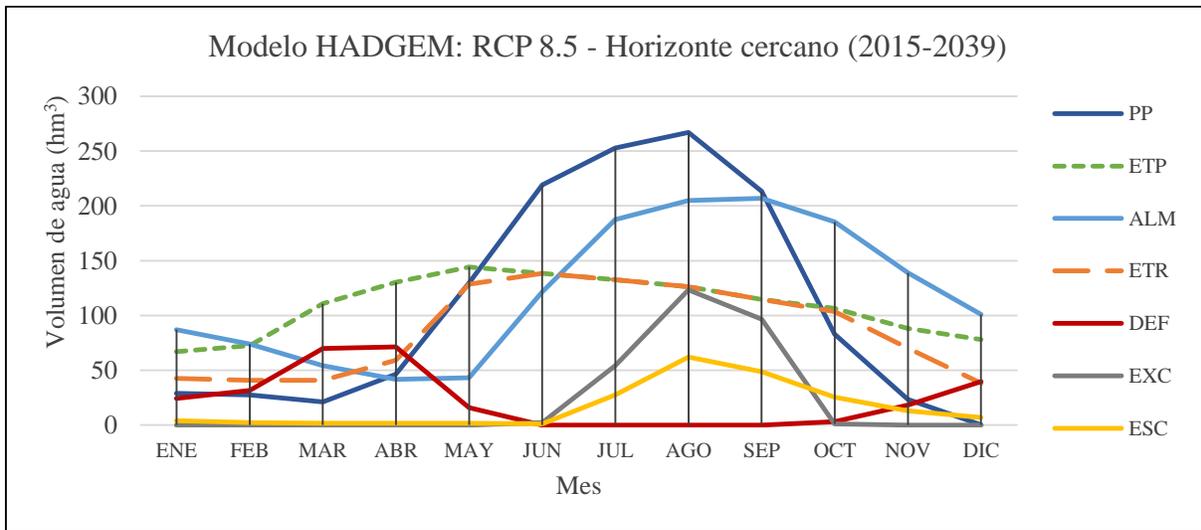


Figura 5.13.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo HADGEM.

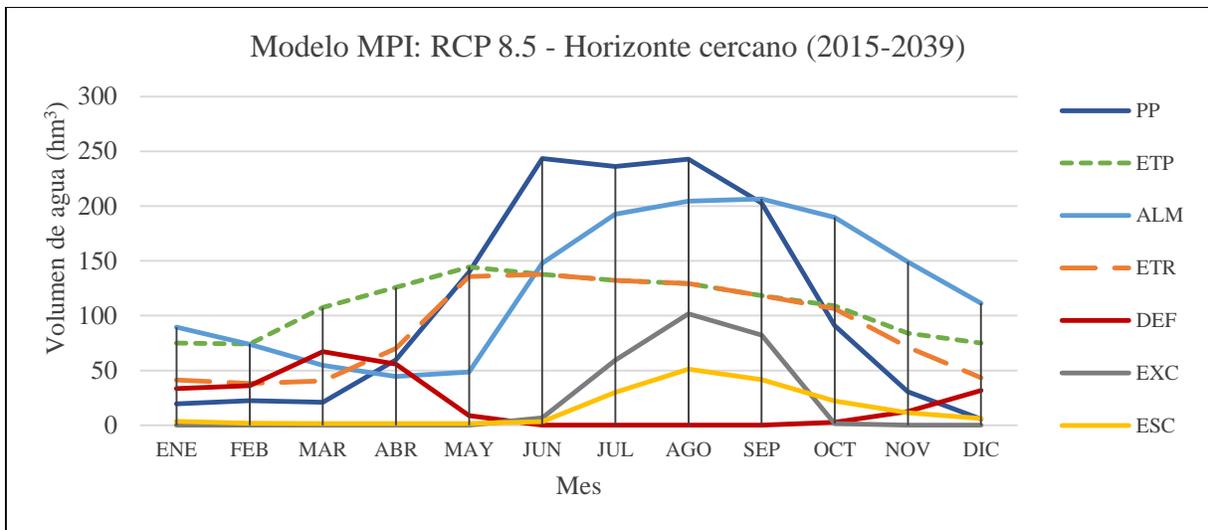


Figura 5.14.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano (2015-2039) respectivo al modelo MPI.

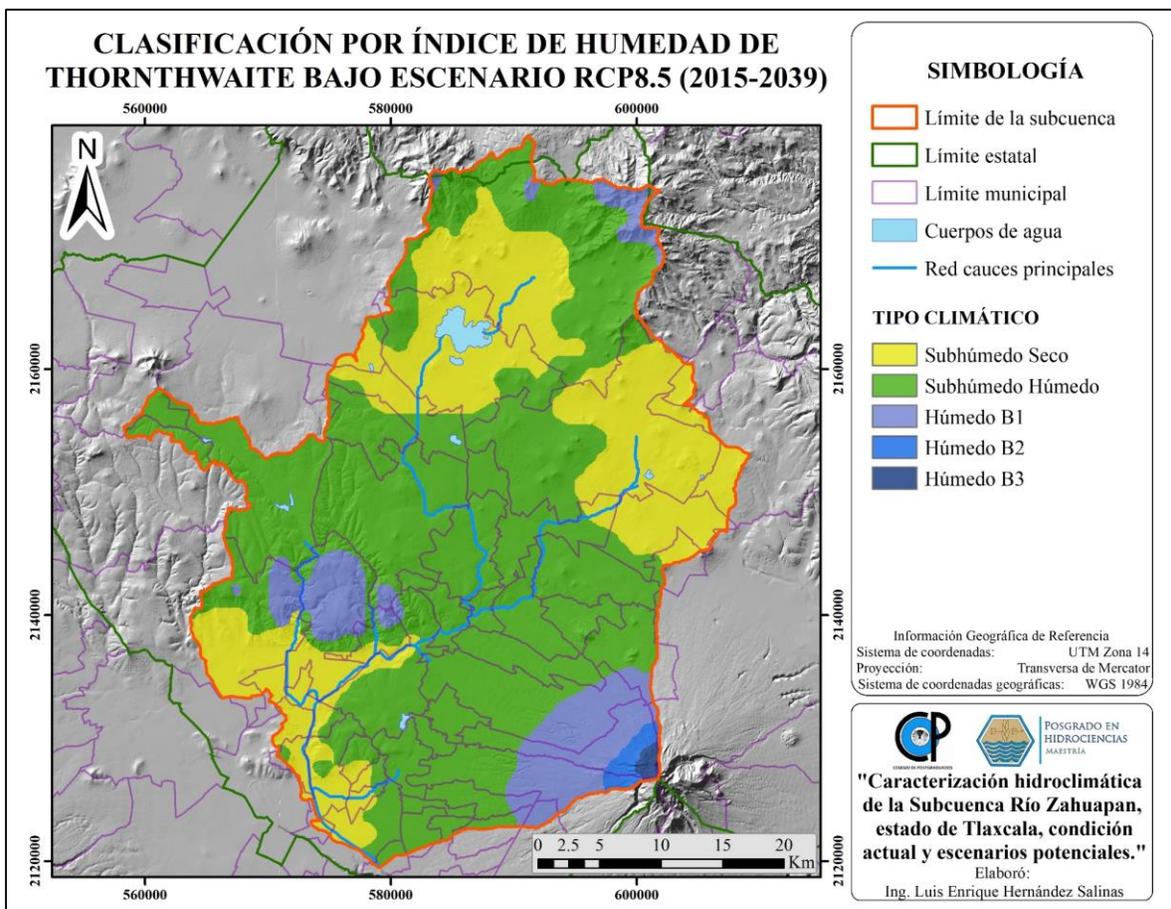


Figura 5.15.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP8.5 (2015-2039).

Para el escenario RCP8.5 en el horizonte cercano llaman la atención los modelos HADGEM y MPI ya que ambos manifiestan incrementos considerables en la precipitación, sobre todo en los meses de agosto y septiembre, lo cual tiene un impacto directo en la producción de excedentes y por consiguiente de escorrentías, de igual manera el efecto de tal incremento en la disponibilidad de agua de lluvia se refleja en que los cambios en la distribución climática es ligeramente menor sobre lo observado para el escenario RCP4.5.

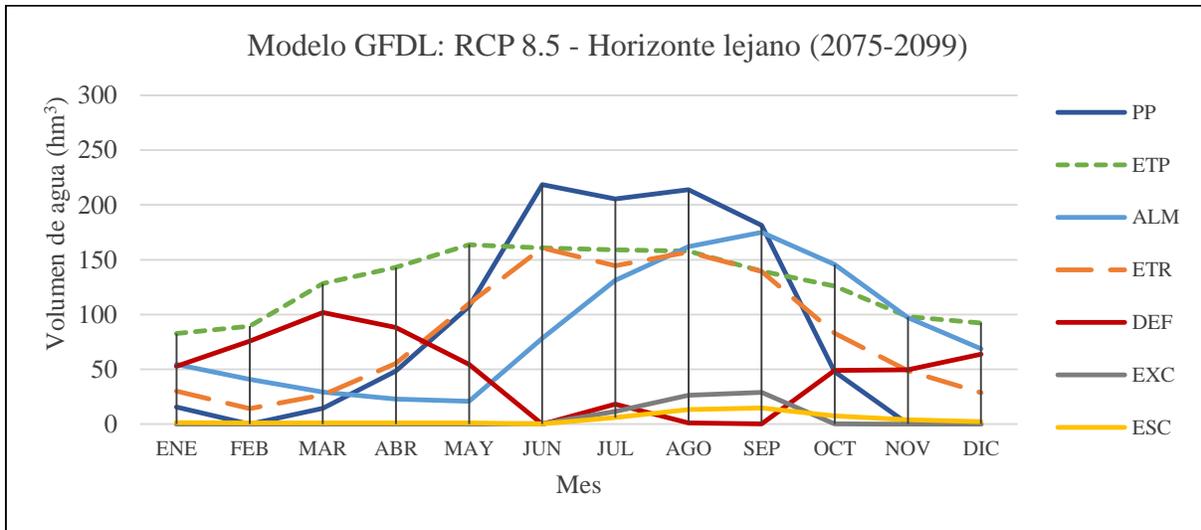


Figura 5.16.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo GFDL.

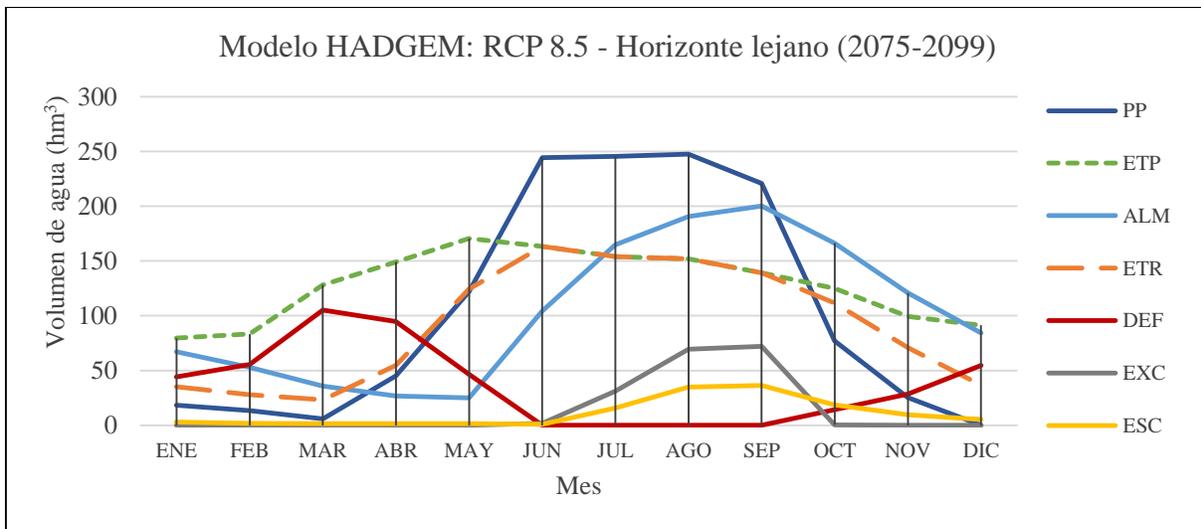


Figura 5.17.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo HADGEM.

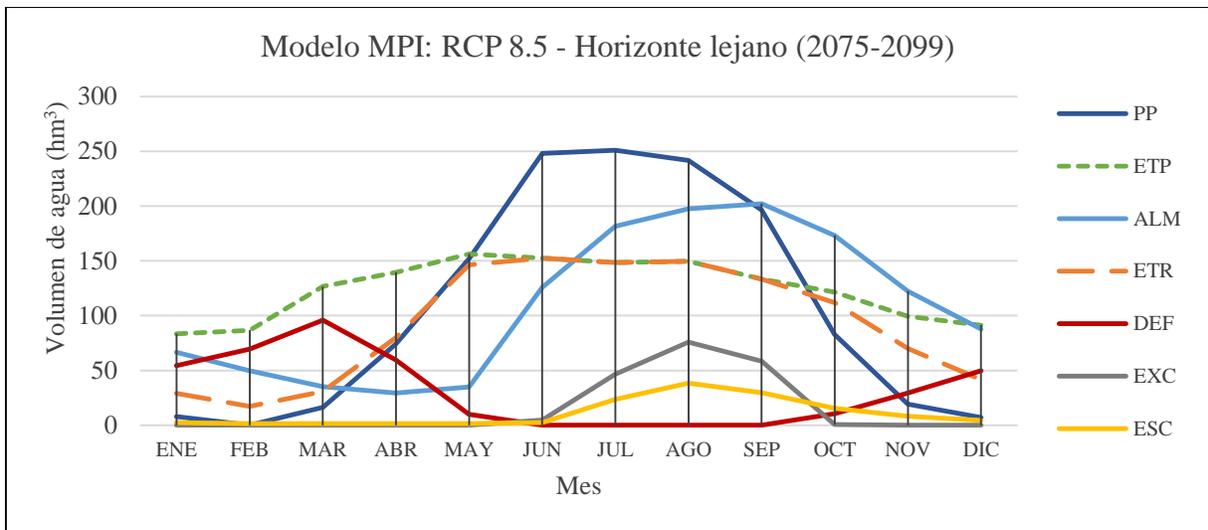


Figura 5.18.- Comportamiento del balance hídrico de la subcuenca río Zahuapan bajo el escenario RCP8.5 en el horizonte lejano (2075-2099) respectivo al modelo MPI.

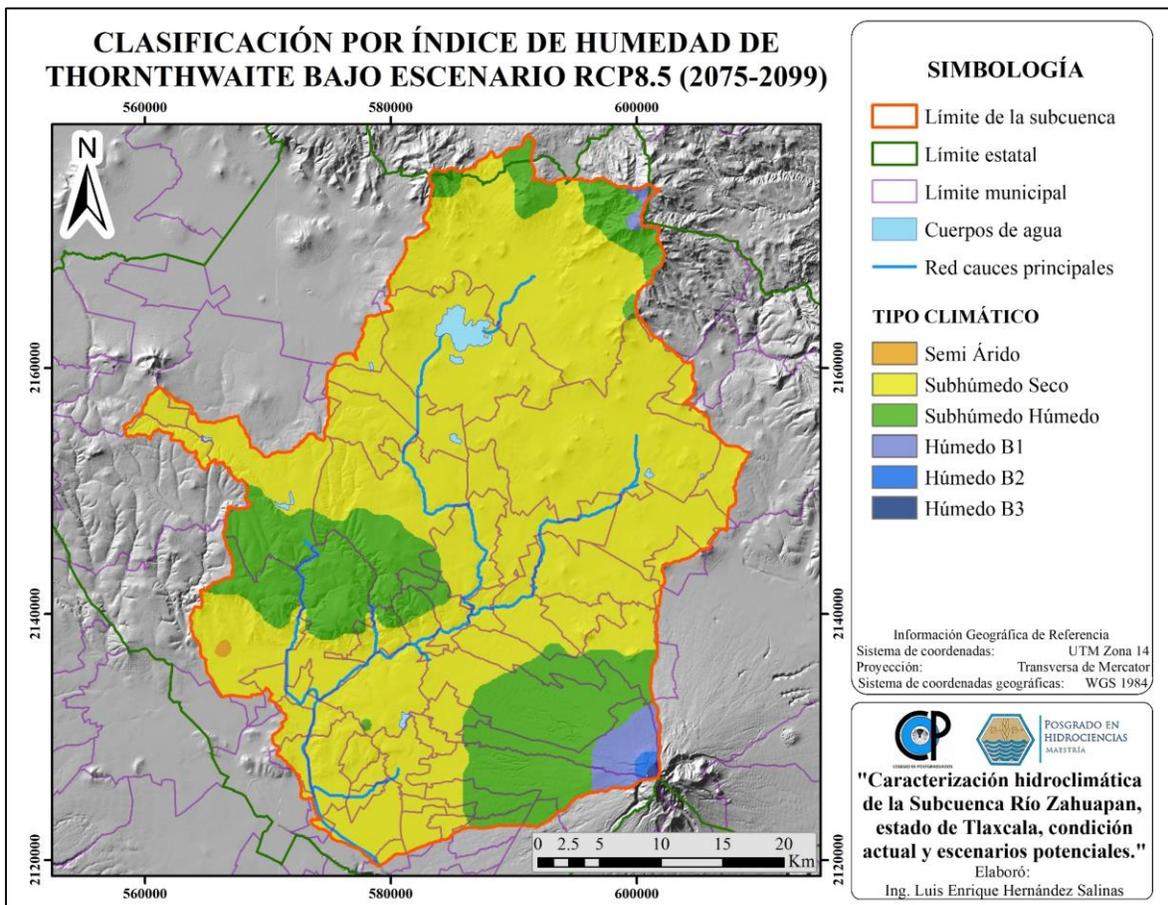


Figura 5.19.- Distribución de climas por índice de humedad para el escenario RCP4.5 (2075-2099).

Aunque el escenario RCP8.5 hacia el horizonte lejano no se ve impactado de manera tan severa en la distribución y cantidad de precipitación a presentarse, las altas temperaturas a esperarse con respecto al periodo de referencia provocarían incrementos considerables en la evapotranspiración potencial, producto de ello es que la relación entre ambas variables se ve modificada, de tal manera que la clasificación climática de la subcuenca sea sumamente diferente a la del estado base, dominando un clima subhúmedo seco e, inclusive, aunque es en una proporción sumamente reducida, se observa la aparición de una zona árida al suroeste de la subcuenca.

Bajo los RCP considerados y hacia ambos horizontes temporales empleados se observa un incremento en la superficie del clima subhúmedo seco, lo cual podría conducir hacia procesos de desertificación o a la transición hacia otros tipos de vegetación menos demandantes de agua. Pues como indican Granados-Sánchez *et al.* (2012) las causas de la desertificación son generalmente consecuencia de la sobreexplotación de los recursos naturales y de un clima adverso y cambiante.

Si bien el análisis de cada balance hídrico permite identificar las relaciones de causa efecto en cada variable a lo largo del año, las siguientes secciones condensan los resultados mensuales y anuales, y sus respectivas anomalías con respecto a la línea base para cada variable de mayor relevancia considerando los volúmenes totales para la subcuenca, a fin de conocer los principales indicadores de cambio en cada caso.

5.4.1. Precipitación

El Cuadro 5.4 y graficas subsecuentes permiten identificar que la tendencia de cambio en el horizonte cercano es a incrementar las precipitaciones en algunos meses durante la primera parte del año y hasta el mes de septiembre, sobre todo en el mes de agosto, para los modelos HADGEM y MPI; mientras que en el periodo septiembre-diciembre el volumen tiende a ser menor que el del periodo de referencia. Por su parte en el horizonte lejano, en el periodo mayo a septiembre, pueden presentarse algunos incrementos con respecto al estado base. En todos los casos el modelo GFDL manifiesta reducciones en el volumen mensual a lo largo del año.

A partir de lo realizado por Ruiz-Corral *et al.* (2016) en un estudio de regionalización de los impactos del cambio climático en la temperatura y precipitación a nivel nacional, quienes consideraron un ensamble de 11 MCG, es posible identificar para el estado de Tlaxcala

básicamente 2 comportamientos específicos, uno de ellos en la fracción norte de la entidad y el segundo dominando la zona centro y sur. Ambos grupos indican una reducción de la precipitación de entre 10 y 50 mm tanto en el periodo primavera-verano como en otoño-invierno hacia mediados de siglo bajo escenario RCP4.5, lo que representan entre el 3 y 13 % de la lámina anual promedio para la subcuenca, respectivamente. Mientras que Salinas-Prieto *et al.* (2015) consideraron el método REA para un ensamble de 14 MCG para identificar el comportamiento de las variables precipitación y temperaturas máxima y mínima en el territorio nacional, sus resultados indican que el estado de Tlaxcala presentaría una modificación casi nula en la precipitación para el horizonte lejano bajo RCP4.5 y RCP8.5 en el periodo otoño-invierno, mientras que para el periodo primavera-verano se esperarían reducciones de entre 3 y 12 % para el horizonte y escenarios evaluados.

Derivado del análisis de los tres MCG empleados en este trabajo podemos observar que en el futuro cercano el modelo GFDL muestra una reducción en el periodo primavera-verano, mientras que los modelos MPI y HADGEM indican por el contrario un incremento en los valores de precipitación para dicho periodo. La diferencia en los valores obtenidos para la zona de estudio con respecto a lo reportado por Ruiz-Corral *et al.* (2016) y Salinas-Prieto *et al.* (2015) para la entidad son atribuibles a la escala de los recursos climáticos empleados para la elaboración de los mismos, ya que ellos emplearon imágenes *raster* con enmallado de 50 km y 55.66 km de resolución, respectivamente, mientras que en esta investigación se empleó información con resolución de 30" (926 metros aproximadamente). Lo cual sirve de ejemplo de la necesidad de realizar investigaciones del impacto local del fenómeno de cambio climático sobre las variables hidrometeorológicas, pues dentro de una zona relativamente pequeña como lo es la subcuenca del río Zahuapan se observan alteraciones tanto positivas como negativas en la lámina precipitada a lo largo del año.

Cuadro 5.3.- Anomalía en volúmenes de precipitación esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE- NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	-10.7%	-79.9%	-57.3%	16.9%	19.3%	-5.5%	-9.6%	-1.4%	-12.0%	-35.5%	-10.4%	36.8%	-7.13%
G45HL	34.9%	-100.0%	-56.0%	-2.9%	14.0%	-4.1%	-4.3%	4.8%	-6.1%	-35.0%	-79.3%	10.2%	-6.12%
G85HC	259.4%	-21.9%	-4.2%	-9.9%	8.5%	-1.6%	-0.6%	-8.3%	-21.4%	-40.0%	-37.8%	47.7%	-7.38%
G85HL	89.9%	-99.7%	-18.4%	-10.2%	0.1%	-3.0%	-8.0%	-2.7%	-11.0%	-52.0%	-99.7%	-99.2%	-11.82%
H45HC	46.4%	88.8%	-84.1%	-46.3%	15.4%	-0.9%	-2.6%	1.2%	-0.1%	-4.5%	41.9%	-99.7%	-1.64%
H45HL	213.8%	63.7%	-93.8%	-45.6%	3.2%	-5.5%	3.7%	14.1%	8.9%	10.4%	147.7%	-66.0%	5.50%
H85HC	249.2%	195.1%	19.1%	-13.7%	21.0%	-2.8%	13.2%	21.5%	4.7%	-16.5%	21.3%	-96.9%	9.94%
H85HL	122.1%	43.0%	-67.0%	-16.0%	13.9%	8.4%	10.0%	12.6%	8.4%	-22.4%	30.6%	-99.8%	6.01%
M45HC	134.3%	195.6%	47.5%	38.5%	39.0%	10.2%	14.2%	16.4%	-3.2%	-30.0%	-10.3%	140.2%	13.56%
M45HL	94.7%	76.5%	22.2%	14.9%	22.1%	6.7%	9.2%	9.3%	-4.3%	-12.0%	31.1%	66.6%	8.09%
M85HC	135.2%	142.4%	19.4%	11.0%	30.2%	8.0%	5.8%	10.6%	-0.5%	-8.4%	57.8%	-15.7%	10.16%
M85HL	-4.3%	-97.8%	-8.0%	37.8%	41.7%	10.0%	12.4%	10.1%	-3.5%	-16.7%	-1.4%	6.4%	8.62%

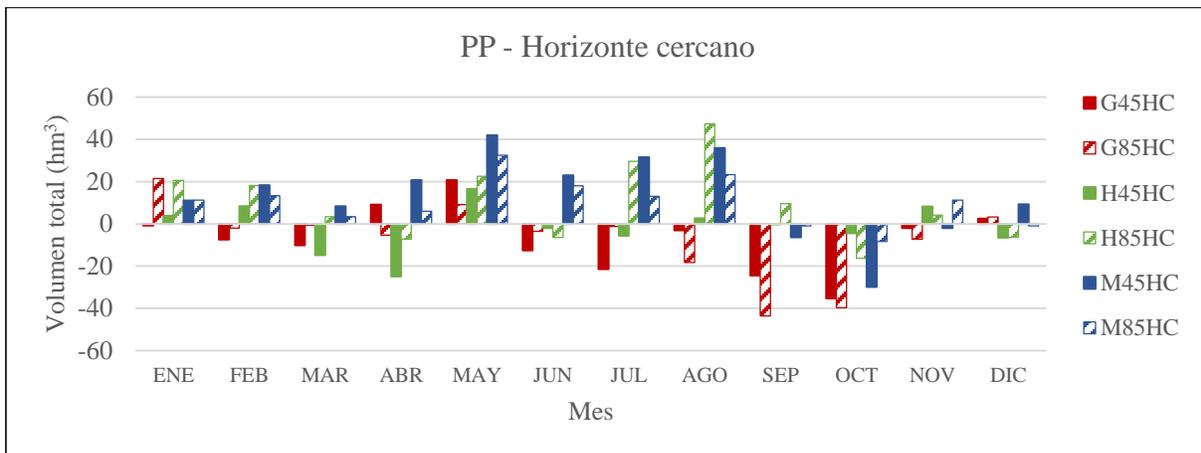


Figura 5.20.- Diferencia del volumen de precipitación total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

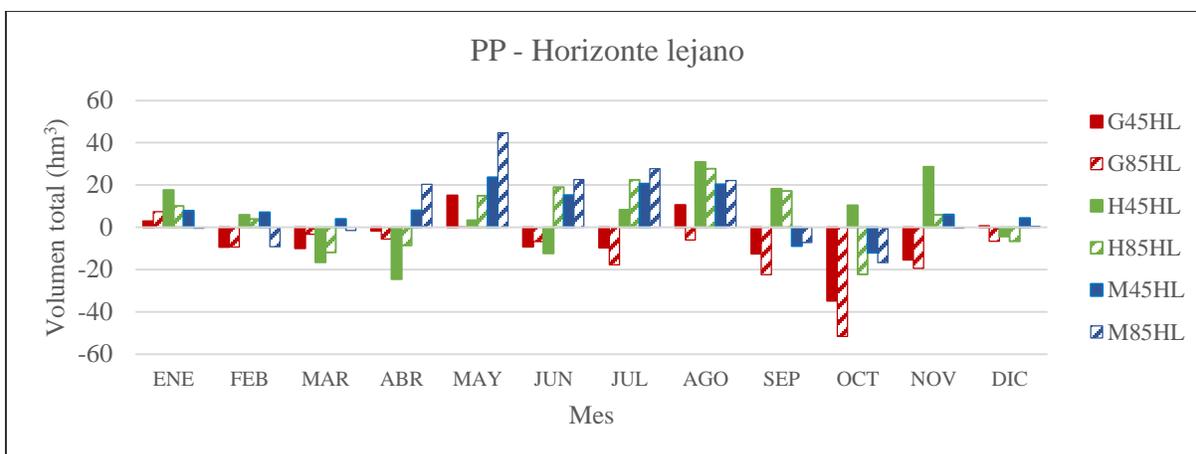


Figura 5.21.- Diferencia del volumen de precipitación total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

5.4.2. Temperatura media

Cuadro 5.4.- Anomalía en valores de temperatura media esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCENARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	0.9	1.1	2.8	1.5	1.3	1.5	1.9	2.1	1.8	1.8	1.5	1.9	1.7
G45HL	3.4	3.3	4.1	4.0	3.9	3.0	3.5	3.6	3.3	3.6	3.2	3.4	3.5
G85HC	0.9	1.1	2.1	1.4	1.6	1.2	1.7	2.1	2.0	2.1	1.9	1.8	1.6
G85HL	4.5	4.9	5.7	5.1	5.1	5.0	5.8	6.2	5.8	5.8	5.3	5.8	5.4
H45HC	0.4	0.5	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7	1.9	1.6	1.1	1.0	1.6	1.4
H45HL	2.6	2.7	4.0	4.3	4.2	3.8	3.4	3.5	3.0	2.7	2.6	3.0	3.3
H85HC	0.0	0.3	1.9	2.0	1.8	1.8	1.8	1.5	1.5	1.7	1.8	1.6	1.5
H85HL	4.1	4.2	5.7	5.5	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.4	5.7	5.4
M45HC	0.8	0.6	1.8	1.5	1.5	1.2	1.0	1.3	1.6	1.9	1.5	1.7	1.4
M45HL	1.9	2.1	3.3	3.1	3.2	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	2.8	2.5	2.7
M85HC	1.0	0.6	1.6	1.6	1.8	1.7	1.8	1.9	1.9	2.1	1.3	1.4	1.6
M85HL	4.0	4.1	5.1	4.4	4.2	4.5	4.7	5.2	4.9	5.0	4.9	5.2	4.7

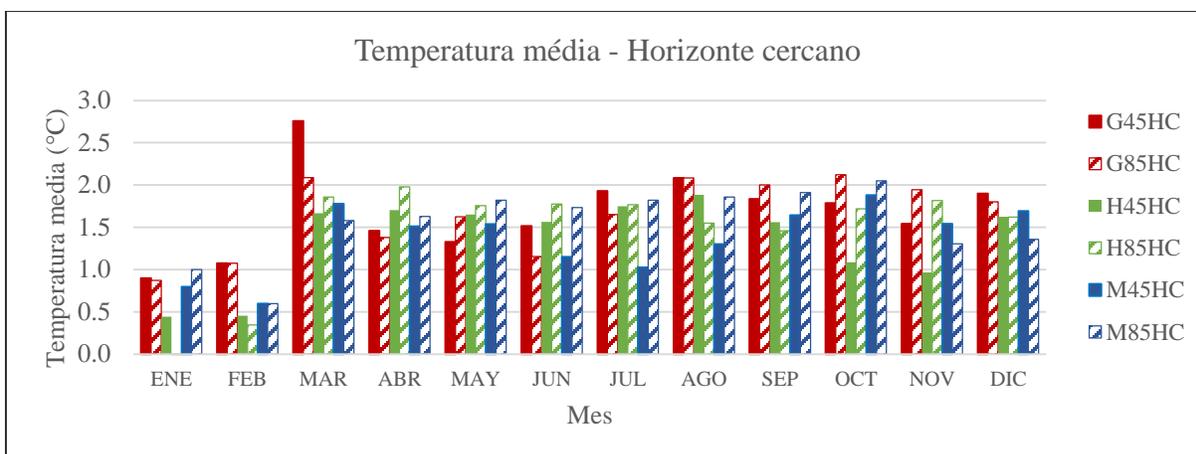


Figura 5.22.- Diferencia de la temperatura media mensual promedio en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

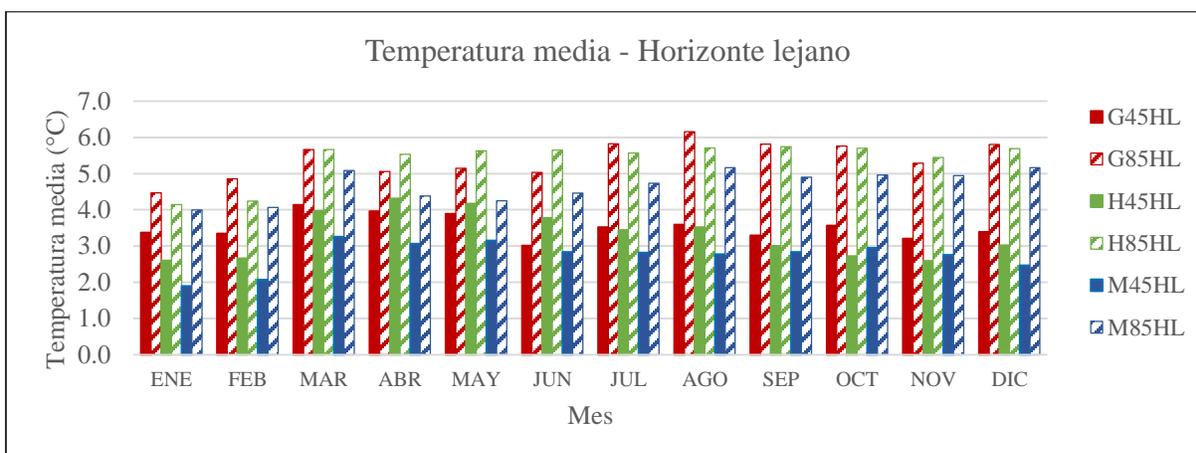


Figura 5.23.- Diferencia de la temperatura media mensual promedio en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099).

Los incrementos en la temperatura media mensual para la subcuenca mantienen una tendencia similar en todos los escenarios y modelos hacia el horizonte cercano, siendo más pronunciadas las diferencias entre escenarios RCP en el horizonte lejano donde existe una amplitud promedio de 2 °C a lo largo del año. Recuperando nuevamente lo obtenido por Ruiz-Corral *et al.* (2016), para el estado de Tlaxcala hacia el año 2050 bajo RPCP4.5 se espera un incremento de entre 1 y 3 °C en el periodo primavera-verano y de 1 a 2 °C para el periodo otoño-invierno, condición muy similar en lo observado para la subcuenca para el futuro cercano en los 3 MCG empleados en este trabajo.

5.4.3. Evapotranspiración potencial

Cuadro 5.5.- Anomalía en volúmenes de evapotranspiración potencial esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE- NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	12.6%	13.9%	29.7%	13.8%	12.1%	14.5%	19.2%	20.6%	18.3%	19.2%	19.2%	25.3%	17.96%
G45HL	30.3%	28.0%	34.9%	30.2%	28.9%	20.3%	26.4%	27.2%	24.3%	28.6%	26.1%	31.4%	27.76%
G85HC	12.0%	13.8%	22.4%	13.0%	14.7%	10.9%	16.3%	20.6%	19.9%	-0.1%	23.7%	23.9%	15.66%
G85HL	26.2%	30.9%	40.0%	31.5%	32.6%	36.4%	42.3%	45.2%	41.3%	41.7%	36.6%	46.3%	37.73%
H45HC	9.0%	8.5%	19.8%	17.7%	16.4%	16.1%	19.0%	20.0%	17.4%	13.5%	14.2%	24.3%	16.64%
H45HL	21.1%	20.5%	34.0%	34.6%	32.2%	28.7%	26.4%	27.1%	22.0%	19.6%	20.0%	27.2%	26.79%
H85HC	2.5%	6.0%	21.0%	19.8%	16.8%	17.3%	18.6%	16.2%	15.8%	19.9%	23.2%	23.5%	17.07%
H85HL	21.6%	22.2%	40.1%	37.1%	38.1%	38.4%	37.9%	39.7%	40.7%	40.7%	38.7%	44.8%	37.25%
M45HC	12.3%	9.3%	19.8%	14.9%	14.6%	11.7%	11.1%	14.0%	17.2%	21.0%	20.1%	23.8%	15.49%
M45HL	18.3%	19.1%	30.5%	25.2%	25.2%	22.9%	23.7%	23.4%	24.3%	26.5%	27.0%	26.3%	24.49%
M85HC	14.5%	8.7%	17.5%	15.7%	17.0%	16.7%	18.4%	19.0%	19.6%	22.6%	17.0%	19.0%	17.35%
M85HL	27.5%	27.2%	38.3%	28.4%	26.6%	29.3%	32.9%	37.7%	34.9%	36.9%	38.8%	44.9%	33.19%

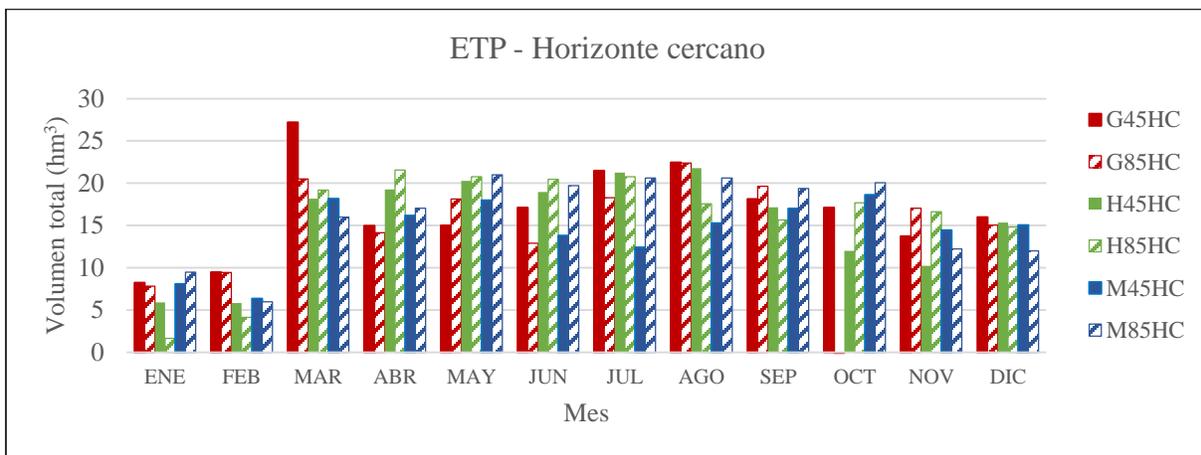


Figura 5.24.- Diferencia del volumen de evapotranspiración potencial total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

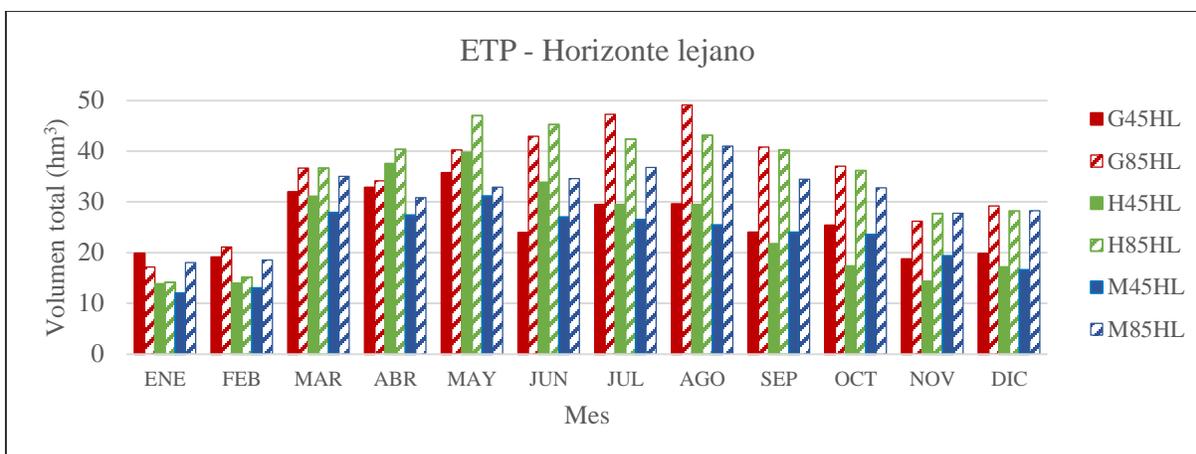


Figura 5.25.- Diferencia del volumen de evapotranspiración potencial total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

Debido a la dependencia de la evapotranspiración potencial a los valores de temperatura media mensual es posible observar un comportamiento similar entre los volúmenes totales presentes en la subcuenca y la tendencia del incremento en la temperatura, siendo bastante similar entre todos los escenarios RCP y MCG en el horizonte cercano y diferenciándose entre escenarios RCP hacia el horizonte lejano, sobre todo durante los meses de julio y agosto, siendo los resultados del modelo GFDL los de mayor intensidad para este último mes.

Reportado por Rasilla *et al.* (2012), un comportamiento potencial de los efectos del cambio climático corresponde a un incremento generalizado de la ETP, pero variable en su intensidad a lo largo del año. Siendo más acentuada la diferencia en los meses de verano y relativamente moderada en invierno, condición que se presenta en el área de estudio bajo todos los escenarios. De acuerdo a lo obtenido por Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021), quienes hicieron uso de escenarios generados por 5 MCG (HadGEM2- ES, GFDL_CM3, MPI-ESM-LR, CNRMCM5 y REA), la región de estudio, al igual que el resto del país, manifestaran incrementos en la evapotranspiración potencial como consecuencia del incremento generalizado de la temperatura. E inclusive, en el estado de Tlaxcala podría manifestarse un adelanto del final del periodo de crecimiento en hasta dos semanas dadas las relaciones entre ETP y precipitación.

5.4.4. Evapotranspiración real

Cuadro 5.6.- Anomalía en volúmenes de evapotranspiración real esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE- NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	-17.4%	-34.6%	-31.6%	8.1%	14.7%	14.5%	15.7%	20.6%	18.3%	3.8%	-3.9%	-3.7%	7.50%
G45HL	-9.6%	-43.2%	-37.8%	-6.8%	13.0%	20.3%	23.3%	27.2%	24.3%	10.7%	-13.8%	-13.0%	8.67%
G85HC	29.1%	-12.6%	-5.4%	-9.9%	7.1%	10.9%	16.3%	20.6%	16.8%	-13.8%	0.3%	-1.8%	6.96%
G85HL	-13.4%	-53.0%	-27.0%	-14.1%	0.6%	36.4%	29.3%	44.4%	41.0%	-6.6%	-23.9%	-31.9%	10.06%
H45HC	1.7%	14.9%	-31.5%	-34.7%	13.0%	16.1%	19.0%	20.0%	17.4%	8.0%	11.5%	4.7%	8.93%
H45HL	42.1%	24.9%	-24.8%	-30.5%	5.0%	28.7%	26.4%	27.1%	22.0%	15.1%	26.1%	21.3%	16.81%
H85HC	23.0%	37.1%	11.8%	-8.3%	17.7%	17.3%	18.6%	16.2%	15.8%	16.6%	9.8%	-8.6%	14.25%
H85HL	1.9%	-6.5%	-36.6%	-15.1%	13.9%	38.4%	37.9%	39.7%	40.7%	25.8%	11.0%	-12.5%	20.58%
M45HC	10.0%	35.5%	18.1%	27.2%	26.7%	11.7%	11.1%	14.0%	17.2%	15.7%	-1.8%	6.7%	15.60%
M45HL	9.1%	12.7%	8.9%	10.9%	20.0%	22.9%	23.7%	23.4%	24.3%	20.4%	12.9%	7.0%	18.91%
M85HC	19.1%	28.4%	10.5%	8.8%	24.2%	16.7%	18.4%	19.0%	19.6%	19.8%	11.7%	3.6%	17.41%
M85HL	-16.0%	-41.7%	-15.2%	24.4%	34.2%	29.3%	32.9%	37.7%	34.9%	26.2%	9.7%	-0.4%	22.70%

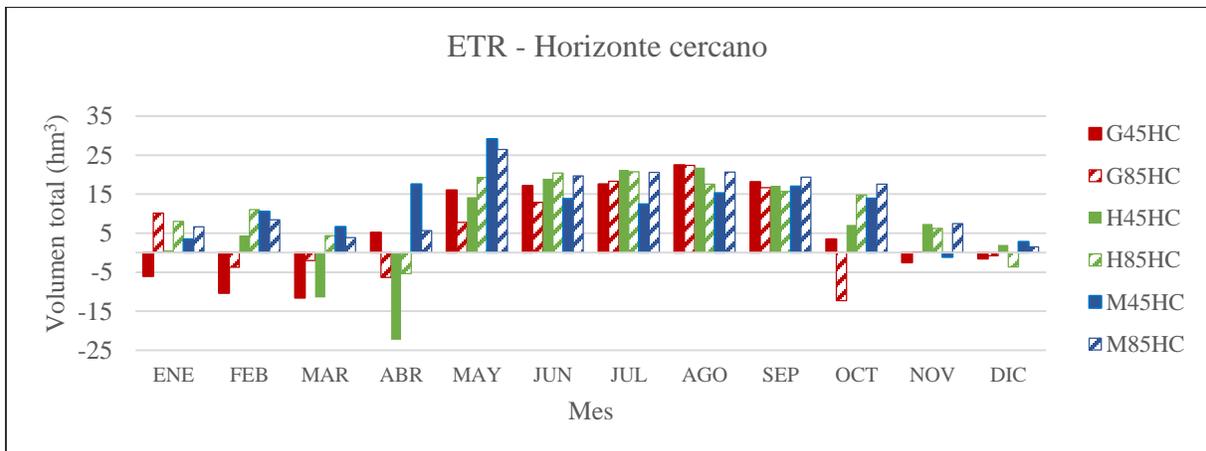


Figura 5.26.- Diferencia del volumen de evapotranspiración real total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

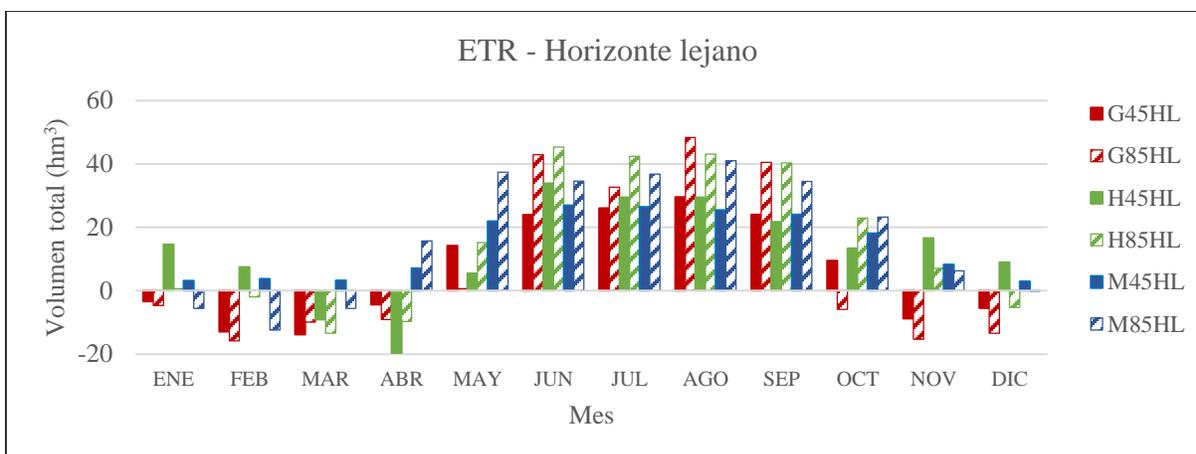


Figura 5.27.- Diferencia del volumen de evapotranspiración real total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

Si bien la evapotranspiración potencial indica incrementos durante todo el año, la disponibilidad de humedad suficiente para satisfacer dichas necesidades solo puede encontrarse en los meses de mayores precipitaciones, es por ello que los incrementos de los volúmenes de la evapotranspiración real se ven incrementados de manera significativa en el periodo mayo-octubre; sin embargo, la diferencia de dichos valores con respecto al periodo de referencia es bastante preocupante pues corresponde a humedad que sale del sistema en este proceso.

5.4.5. Almacenamiento en el suelo

Como fue mencionado anteriormente, la evapotranspiración real corresponde al valor de agua que sale del sistema, por lo cual deja de estar disponible para procesos posteriores. Las consecuencias de un incremento en la evapotranspiración real en la subcuenca representan una reducción en el volumen total de agua almacenada en el suelo al término de cada mes. Para esta variable se observa una reducción generalizada de los valores para todos los escenarios RCP y horizontes temporales.

Cuadro 5.7.- Anomalía en volúmenes de agua almacenada en el suelo esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE- NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	-25.3%	-28.2%	-34.3%	-33.6%	-25.4%	-25.8%	-19.1%	-8.6%	-4.8%	-17.0%	-21.4%	-24.1%	-18.9%
G45HL	-34.8%	-39.2%	-44.4%	-47.5%	-47.2%	-34.7%	-23.0%	-9.5%	-5.2%	-19.8%	-29.3%	-32.5%	-24.9%
G85HC	-17.2%	-19.5%	-23.3%	-26.0%	-24.2%	-19.2%	-13.6%	-9.2%	-6.0%	-12.1%	-20.1%	-22.6%	-15.4%
G85HL	-45.4%	-48.7%	-52.3%	-55.0%	-57.3%	-48.5%	-34.6%	-21.7%	-15.8%	-29.3%	-39.9%	-45.6%	-35.9%
H45HC	-12.4%	-10.7%	-19.4%	-28.4%	-24.9%	-20.3%	-13.8%	-6.0%	-2.4%	-3.8%	-4.3%	-12.3%	-10.4%
H45HL	-2.1%	-4.6%	-18.2%	-31.3%	-36.5%	-39.5%	-21.0%	-6.4%	-2.2%	-1.9%	5.0%	-4.1%	-10.7%
H85HC	-13.0%	-7.3%	-11.2%	-17.5%	-11.8%	-19.9%	-6.5%	-0.8%	-0.3%	-10.0%	-14.1%	-20.2%	-9.7%
H85HL	-32.7%	-33.6%	-41.1%	-46.9%	-48.9%	-31.3%	-17.9%	-7.8%	-3.6%	-19.3%	-25.3%	-33.4%	-22.6%
M45HC	-18.7%	-13.9%	-15.3%	-12.3%	13.0%	5.7%	0.3%	0.1%	-0.1%	-15.6%	-20.3%	-20.8%	-7.5%
M45HL	-18.1%	-18.5%	-23.1%	-25.9%	-23.1%	-14.6%	-7.3%	-2.6%	-1.7%	-10.7%	-15.0%	-18.0%	-11.6%
M85HC	-10.6%	-7.2%	-10.2%	-11.9%	-0.3%	-2.6%	-4.1%	-1.1%	-0.5%	-7.9%	-7.8%	-12.0%	-5.5%
M85HL	-33.4%	-37.7%	-42.2%	-41.5%	-28.1%	-17.1%	-9.5%	-4.4%	-2.6%	-15.9%	-24.3%	-30.6%	-18.4%

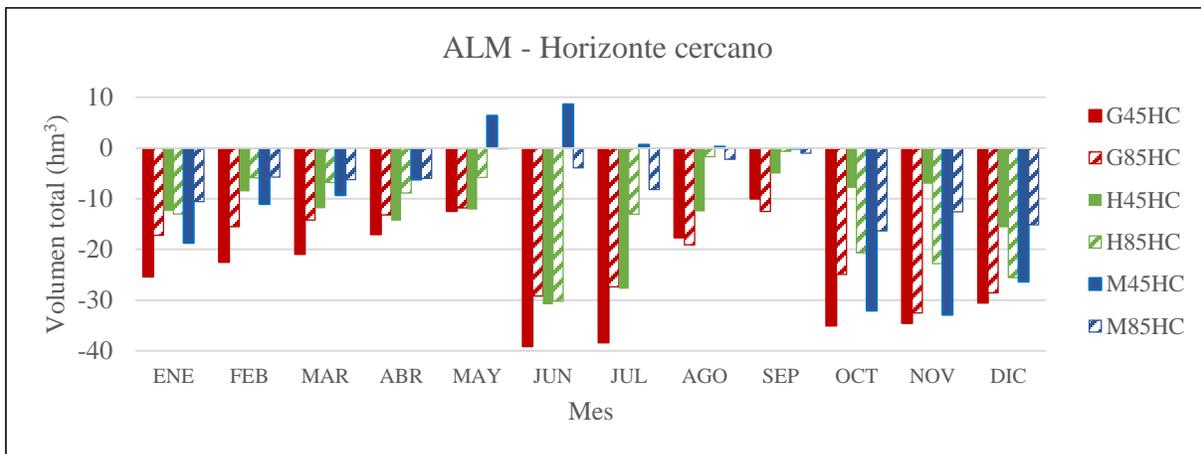


Figura 5.28.- Diferencia del volumen de agua almacenada en el suelo total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

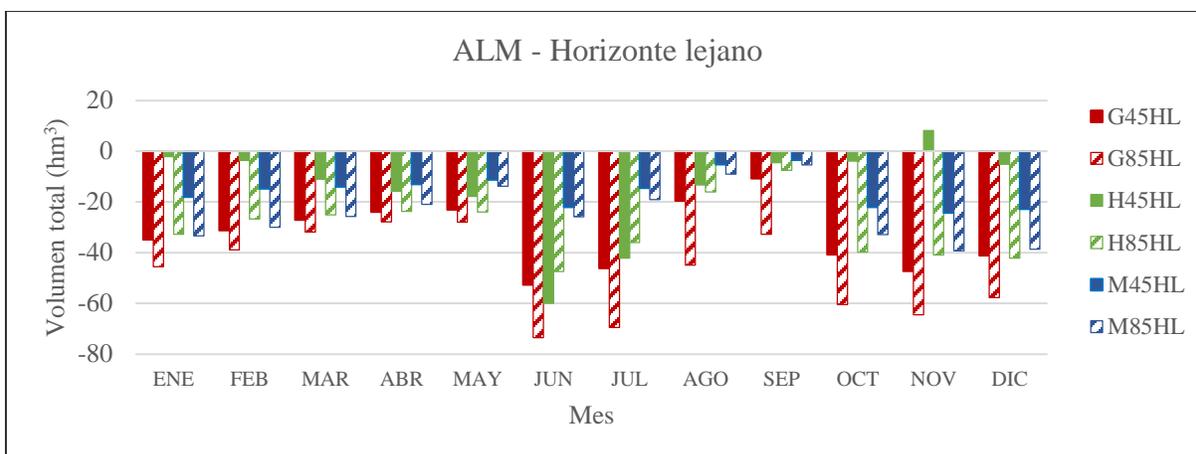


Figura 5.29.- Diferencia del volumen de agua almacenada en el suelo total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

5.4.6. Déficit

Cuadro 5.8.- Anomalía en volúmenes de déficit de agua esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE_NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	46.5%	51.4%	70.5%	22.0%	-7.8%	-	-	-	-	17284.7%	206.1%	82.8%	63.9%
G45HL	75.6%	83.3%	83.5%	84.1%	149.1%	-	-	-	-	20269.1%	350.1%	119.3%	110.9%
G85HC	-7.4%	34.3%	40.8%	46.1%	71.2%	-	-	-	-	17220.1%	213.7%	74.7%	54.6%
G85HL	71.1%	96.2%	85.1%	98.1%	276.1%	-	-	-	-	54601.8%	527.7%	201.4%	160.8%
H45HC	17.3%	3.6%	53.9%	93.4%	41.4%	-	-	-	-	6232.1%	36.7%	63.2%	49.8%
H45HL	-2.6%	17.0%	73.0%	128.7%	236.8%	-	-	-	-	5215.8%	-29.3%	38.8%	69.7%
H85HC	-20.6%	-18.0%	27.0%	60.3%	9.3%	-	-	-	-	3278.9%	132.2%	87.1%	29.0%
H85HL	43.9%	44.5%	91.2%	113.0%	220.5%	-	-	-	-	16039.8%	262.9%	158.1%	109.0%
M45HC	15.0%	-11.0%	20.9%	-3.3%	-77.9%	-	-	-	-	5274.0%	198.2%	57.8%	14.9%
M45HL	28.7%	24.0%	44.8%	45.6%	63.5%	-	-	-	-	6534.1%	141.6%	64.7%	48.4%
M85HC	9.3%	-6.5%	22.0%	25.4%	-38.4%	-	-	-	-	2794.6%	60.3%	49.6%	16.9%
M85HL	76.8%	80.6%	74.0%	34.1%	-31.4%	-	-	-	-	11571.7%	274.3%	134.5%	78.4%

Siendo un complemento de lo observado en la evapotranspiración real, el déficit de humedad corresponde a la cantidad de agua requerida para satisfacer la demanda hídrica representada por la evapotranspiración potencial, está condicionada a los cambios en esta última variable así como a las modificaciones en la precipitación, por lo que las tendencias observadas en las siguientes figuras son muy particulares a cada escenario y modelo de circulación general, sin

embargo, es posible rescatar que en su mayoría significan incrementos en la primera mitad del año, acentuándose en los meses de marzo a mayo, lo cual es importante de analizar considerando que los periodos de siembra de los principales cultivos de temporal se realiza en el mismo periodo.

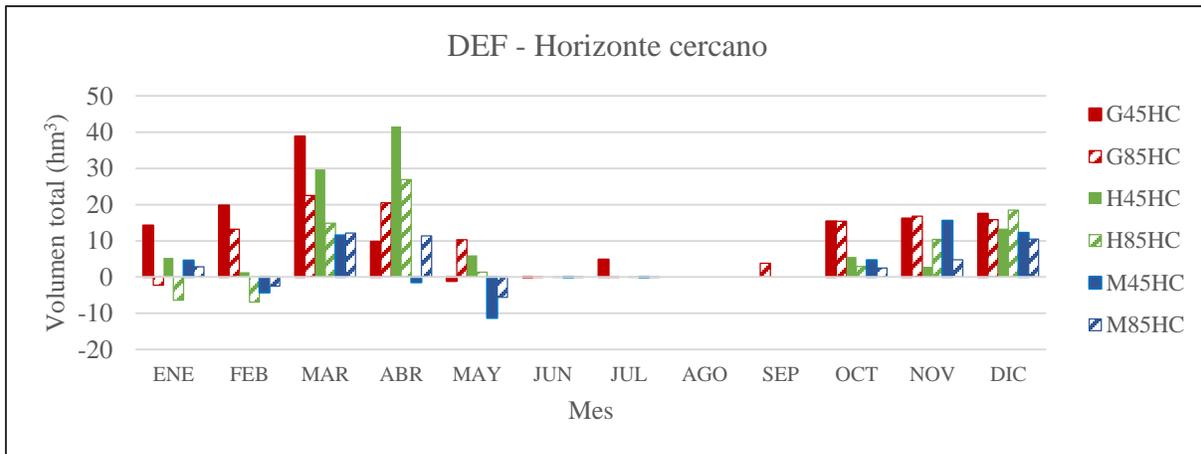


Figura 5.30.- Diferencia del volumen de déficit de agua total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

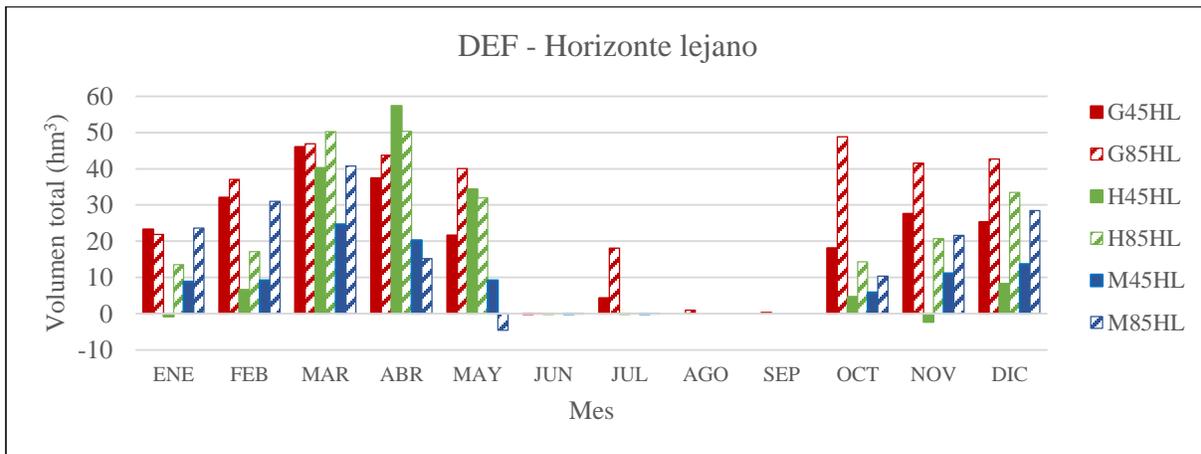


Figura 5.31.- Diferencia del volumen de déficit de agua total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

Resaltan los incrementos que se presentan en el modelo GFDL sobre todo en el mes de julio, sin embargo, estos no fueron representados en el Cuadro 5.9 debido al formato de la misma al tratarse de una comparativa con el valor de referencia que para dicho mes es 0.

Ya que el cálculo del balance hídrico permite identificar la relación entre la precipitación de un sitio y la pérdida de humedad por procesos de evapotranspiración, es posible identificar la época de mayores excedentes de humedad, pero igual de importante es determinar el periodo en el que los cultivos, y otras coberturas vegetales, llegarán a necesitar de una mayor cantidad de agua e inclusive podrán agotar las reservas de agua del suelo, siendo de esta manera un componente fundamental a ser considerado en la planeación de los procesos productivos de una región (Bohn y Campo, 2010).

Si bien Ortega-Gaucin *et al.* (2014) consideran que actualmente el territorio tlaxcalteca dentro de la cuenca del río Balsas posee un bajo grado de vulnerabilidad ante la sequía, el comportamiento del déficit de humedad es considerado para este trabajo como uno de los indicadores principales del impacto del cambio climático en la subcuenca, observándose entonces en las simulaciones realizadas que condiciones de estrés hídrico se agravaran en el futuro.

5.4.7. Exceso

Vinculado a todos los procesos descritos anteriormente, la producción de excesos de humedad se ve reducida en la mayoría de los casos hacia el horizonte cercano, salvo por el modelo MPI con RCP4.5 y al modelo HADGEM con RCP8.5. Para el horizonte lejano todas las combinaciones indican decrementos en los volúmenes totales, resaltando nuevamente que el MCG GFDL es el que posee los menores valores.

Cuadro 5.9.- Anomalía en volúmenes de exceso de agua esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE_NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	-	-	-	-	-	-62.5%	-62.1%	-44.0%	-48.4%	-97.5%	-	-	-52.1%
G45HL	-	-	-	-	-	-77.4%	-65.9%	-43.5%	-43.7%	-98.2%	-	-	-51.3%
G85HC	-	-	-	-	-	21.7%	-34.2%	-46.7%	-63.5%	-96.1%	-	-	-51.0%
G85HL	-	-	-	-	-	-90.8%	-81.4%	-75.0%	-72.3%	-99.6%	-	-	-76.7%
H45HC	-	-	-	-	-	-51.7%	-48.0%	-32.8%	-24.0%	-65.7%	-	-	-34.6%
H45HL	-	-	-	-	-	-88.6%	-62.1%	-26.1%	-11.9%	-24.1%	-	-	-29.7%
H85HC	-	-	-	-	-	-52.7%	-13.3%	17.5%	-6.8%	-90.8%	-	-	-3.7%

H85HL	-	-	-	-	-	-61.2%	-50.2%	-33.7%	-30.5%	-96.7%	-	-	-39.3%
M45HC	-	-	-	-	-	155.3%	43.3%	20.1%	-22.1%	-97.0%	-	-	7.1%
M45HL	-	-	-	-	-	-20.4%	-21.5%	-13.6%	-33.4%	-90.3%	-	-	-25.8%
M85HC	-	-	-	-	-	47.9%	-5.4%	-3.2%	-20.7%	-87.1%	-	-	-12.7%
M85HL	-	-	-	-	-	4.5%	-25.5%	-27.6%	-43.6%	-95.2%	-	-	-35.3%

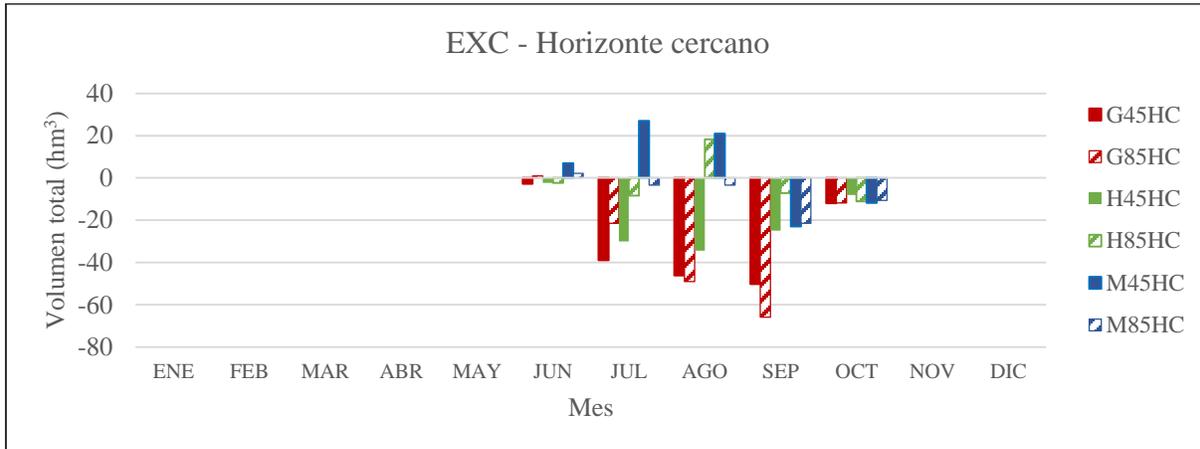


Figura 5.32.- Diferencia del volumen de exceso de humedad total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

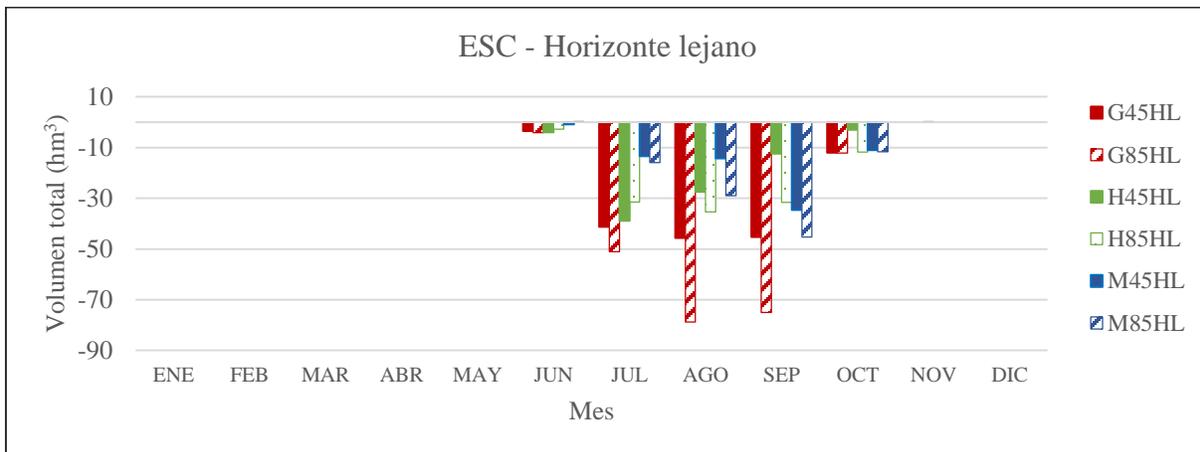


Figura 5.33.- Diferencia del volumen de exceso de humedad total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

Como es puntualizado por Nugroho *et al.* (2019) y Santillán-Gutiérrez *et al.* (2013), una de las mayores utilidades del método es el permitir definir de manera adecuada la duración de la temporada seca de un sitio en particular, lo anterior mediante la consideración de la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Para la subcuenca en general en su estado actual

los meses en los que la ETP supera al valor de PP es de noviembre a mayo, considerándose como meses húmedos de junio a octubre en los cuales se manifestarían excedentes de humedad, sin embargo, bajo todos los escenarios de cambio climático evaluados se prevé que el periodo seco se alargue e inicie en el mes de octubre.

5.4.8. Escorrentías

Esta variable refleja un comportamiento muy similar a los excesos de humedad al tratarse de una proporción de estos últimos, salvo por la continuidad de las curvas hacia los meses de octubre y diciembre, es posible observar las reducciones generalizadas para la mayoría de los casos. El impacto en el balance hídrico bajo las condiciones climatológicas por esperarse coincide con lo reportado por Huang *et al.* (2020) quienes observaron que, aun presentándose mayor precipitación en un sitio, el incremento generalizado en la evapotranspiración potencial impacta en la proporción de agua que es susceptible de convertirse en escorrentías, tanto superficiales como subterráneas y aquella disponible para procesos de percolación.

Cuadro 5.10.- Anomalía en volúmenes de escorrentías esperados bajo cada escenario evaluado con respecto al estado actual (1984-2013) para la subcuenca del río Zahuapan.

ESCE- NARIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
G45HC	-51.1%	-43.4%	-18.6%	-16.4%	-16.4%	-62.2%	-62.1%	-43.9%	-48.2%	-57.4%	-56.5%	-54.7%	-51.0%
G45HL	-47.7%	-40.7%	-17.8%	-15.5%	-15.5%	-76.8%	-65.8%	-43.3%	-43.4%	-53.8%	-52.8%	-51.2%	-49.3%
G85HC	-60.8%	-49.7%	-23.7%	-21.6%	-21.6%	20.3%	-34.1%	-46.5%	-63.2%	-69.0%	-67.8%	-65.7%	-53.9%
G85HL	-71.2%	-63.8%	-45.7%	-44.2%	-44.2%	-90.7%	-81.4%	-74.9%	-72.0%	-77.0%	-76.3%	-74.7%	-74.8%
H45HC	-25.6%	-24.0%	-8.3%	-8.2%	-8.3%	-51.4%	-47.9%	-32.7%	-23.8%	-31.6%	-31.1%	-29.7%	-31.7%
H45HL	-11.6%	-10.6%	-2.2%	-6.5%	-6.8%	-88.4%	-62.1%	-26.1%	-11.8%	-14.2%	-13.9%	-13.6%	-24.3%
H85HC	-17.4%	-16.6%	-2.5%	-1.1%	-1.1%	-52.5%	-13.4%	17.3%	-6.8%	-23.0%	-22.6%	-21.7%	-6.9%
H85HL	-35.5%	-33.2%	-12.2%	-10.3%	-10.3%	-60.7%	-50.2%	-33.7%	-30.4%	-43.0%	-42.3%	-40.3%	-37.6%
M45HC	-29.9%	-26.7%	-2.4%	0.0%	0.0%	152.6%	42.8%	19.9%	-21.9%	-36.2%	-35.5%	-33.7%	-3.3%
M45HL	-39.0%	-33.1%	-7.7%	-5.8%	-5.8%	-20.0%	-21.6%	-13.6%	-33.2%	-43.9%	-43.1%	-41.5%	-28.7%
M85HC	-26.0%	-26.5%	-4.2%	-2.6%	-2.6%	47.0%	-5.5%	-3.2%	-20.6%	-33.2%	-32.5%	-30.7%	-16.3%
M85HL	-47.0%	-37.9%	-10.5%	-8.3%	-8.3%	4.0%	-25.5%	-27.5%	-43.3%	-53.0%	-51.9%	-49.8%	-37.8%

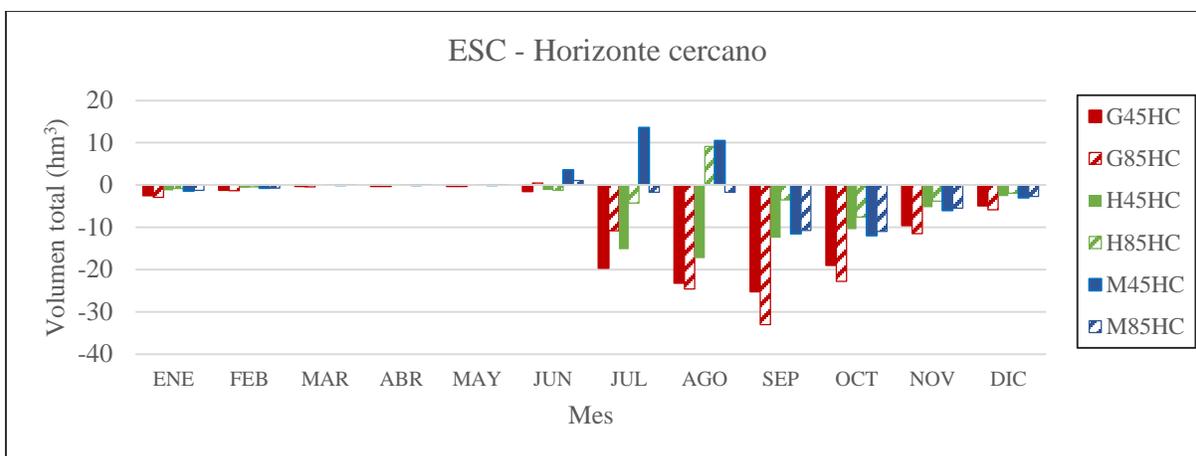


Figura 5.34.- Diferencia del volumen de escorrentía total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte cercano (2015-2039) con respecto a la línea base.

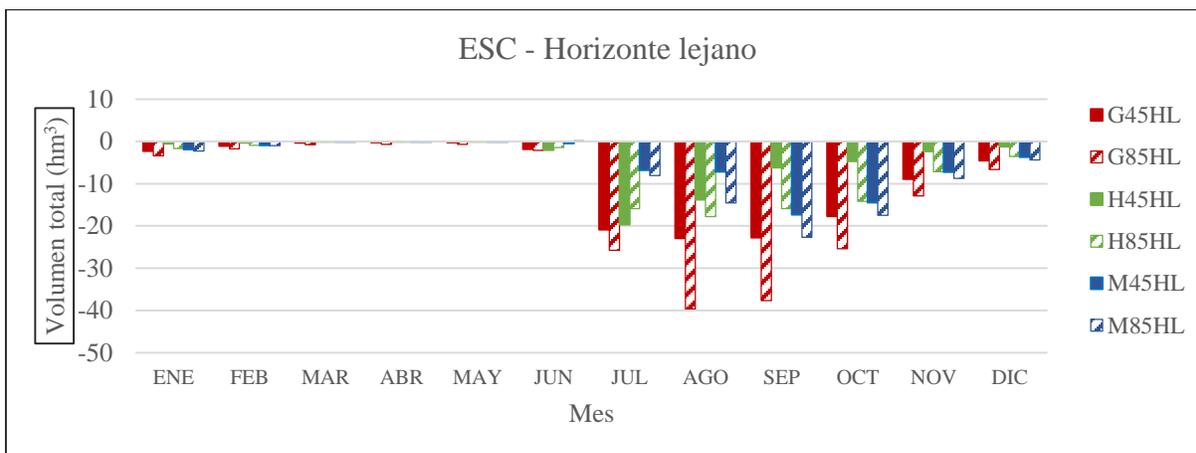


Figura 5.35.- Diferencia del volumen de escorrentía total en la subcuenca para los escenarios en el horizonte lejano (2075-2099) con respecto a la línea base.

La distribución del comportamiento de los cambios bajo los distintos escenarios no solo es temporal, en las anteriores secciones se hizo uso de los volúmenes mensuales totales para la subcuenca a fin de obtener indicadores que fueran fáciles de analizar. En el Anexo C de esta tesis se despliegan mapas mensuales que muestran la distribución espacial específica para quien esté interesado en conocer los impactos potenciales del cambio climático en una zona de interés en particular. Si bien existen diferencias entre los resultados obtenidos por los diferentes MCG, es posible considerar un promedio de los mismos como un indicativo general del comportamiento a esperarse, toda vez que cada MCG representa una abstracción de la realidad proyectada a futuro.

5.5. Impacto sobre las distintas coberturas vegetales

Como parte de la evaluación del impacto del fenómeno para los diversos escenarios sobre los recursos hídricos de la subcuenca, es posible realizar un análisis del comportamiento de los cambios plausibles de esperarse en las distintas coberturas vegetales presentes en la subcuenca. Bajo el supuesto realizado de que en el futuro podría encontrarse la misma distribución del uso de suelo y vegetación que en el estado base, las evaluaciones del balance hídrico-climático permiten identificar cambios en el déficit de humedad requerido para satisfacer la cantidad de evapotranspiración potencial a lo largo de la subcuenca, al igual que en la presencia de excesos de humedad que no puede ser almacenada en el suelo y que es susceptible de convertirse en escorrentías (superficiales y subterráneas) e infiltración al acuífero. Dichas observaciones se realizaron al obtener el valor promedio de cada variable en los tres modelos de circulación para cada escenario de emisiones y horizonte temporal.

Mediante el *software* ArcMap pudieron computarse los principales estadísticos para cada variable en su valor anual para el estado base, y la diferencia de los promedios con respecto al valor del estado base. El Cuadro 5.12 concentra los estadísticos para el estado base, del cual podemos resaltar la obtención de valores de referencia que permiten considerar como válidos el comportamiento del estado base al indicar que el déficit anual de humedad para la cobertura correspondiente a agricultura de riego es de 149 mm en promedio, lo cual considerando su superficie de distribución da un total de 20 hm³, valor muy aproximado a las 22.64 hm³ de agua reportada para el Distrito de Riego 056 en el ciclo 2018-2019, considerando que dicha agua de riego fue la requerida para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos en ausencia de otra fuente.

Cuadro 5.11.- Valores de referencia de Déficit y Excesos en el Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.

Cobertura	Superficie (ha)	Déficit (mm)				Exceso (mm)			
		Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE
Agricultura de temporal	107,659.97	40	225	128	28.3	0	541	176	74.7
Pastizal inducido	13,730.60	34	224	141	39.1	9	502	168	81
Agricultura de riego	13,460.46	90	224	149	25.2	34	265	152	51.8
Vegetación secundaria	12,186.81	31	207	130	40.7	14	537	193	82.4
Bosque de coníferas	6,608.49	22	214	83	48	9	294	171	66.7
Bosque de encino	3,567.58	48	210	132	44.2	0	536	247	117.6
Bosque de táscate	2,047.88	50	206	122	48.7	0	268	127	71.7
Pradera de alta montaña	172.15	24	93	48	16.5	270	361	311	17.9
Tular	59.61	101	109	106	2.8	75	90	81	4.2

*DE=Desviación estándar

Al analizar el comportamiento de los balances hidrológicos para ambos escenarios de emisiones en el futuro cercano es posible observar que la diferencia entre ellos no es tan marcada como lo es hacia el horizonte lejano, inclusive es posible observar en ciertos casos que la disponibilidad de agua producto de precipitaciones podría incrementarse en los escenarios RCP8.5 hacia el horizonte cercano; no obstante, si bien pueden esperarse algunos incrementos en la precipitación el incremento de la temperatura impacta sobre una mayor evapotranspiración potencial y con ello un mayor déficit de humedad, así como un menor volumen de excesos finalmente.

Cuadro 5.12.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP4.5 (2015-2039) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.

Cobertura	Superficie (ha)	Déficit (mm)				Exceso (mm)			
		Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE
Agricultura de temporal	107,659.97	-15	144	53	19.2	-388	182	-54	54.8
Pastizal inducido	13,730.60	-8	113	45	20	-362	181	-18	71.5
Agricultura de riego	13,460.46	38	124	74	14	-156	41	-91	25.6
Vegetación secundaria	12,186.81	-27	92	42	22.5	-376	219	-30	84.2
Bosque de coníferas	6,608.49	-45	78	11	15.7	-102	276	58	68
Bosque de encino	3,567.58	-18	145	39	22.4	-393	156	-53	125.6
Bosque de táscate	2,047.88	-44	115	49	29.4	-121	249	-23	69.7
Pradera de alta montaña	172.15	-11	30	3	8.4	184	337	260	49.9
Tular	59.61	86	97	91	2.9	-68	-54	-60	3.5

*DE=Desviación estándar

Cuadro 5.13.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP8.5 (2015-2039) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.

Cobertura	Superficie (ha)	Déficit (mm)				Exceso (mm)			
		Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE
Agricultura de temporal	107,659.97	10	186	99	25.9	-429	177	-72	56.4
Pastizal	13,730.60	6	187	94	26.4	-394	165	-35	73.4
Agricultura de riego	13,460.46	70	147	102	14.6	-158	41	-98	24.5
Vegetación secundaria	12,186.81	-2	154	85	36.6	-411	206	-46	87.5
Bosque de coníferas	6,608.49	-12	138	30	21.8	-130	273	49	73.7
Bosque de encino	3,567.58	9	172	86	27.5	-434	147	-76	133.1
Bosque de táscate	2,047.88	-11	189	98	38.2	-139	239	-37	73.7
Pradera de alta montaña	172.15	-4	18	7	5.2	225	313	269	27.7
Tular	59.61	133	140	137	1.8	-88	-74	-80	3.7

*DE=Desviación estándar

Para el horizonte lejano las diferencias entre ambos escenarios son más pronunciadas, obteniéndose valores sumamente elevados en las láminas de déficit para el escenario RCP8.5, por ejemplo, para la agricultura de riego la diferencia en la lámina del déficit de humedad llega a ser mayor que el propio valor observado en el estado base, lo que significa que la demanda de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos de riego se incrementará en 25.83 hm³.

Cuadro 5.14.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP4.5 (2075-2099) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.

Cobertura	Superficie (ha)	Déficit (mm)				Exceso (mm)			
		Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE
Agricultura de temporal	107,659.97	-26	136	41	20.2	-375	199	-47	54.5
Pastizal	13,730.60	-23	101	33	21.3	-354	199	-10	73.6
Agricultura de riego	13,460.46	26	110	62	12.5	-148	55	-85	24.5
Vegetación secundaria	12,186.81	-42	82	30	22.3	-366	226	-23	84.3
Bosque de coníferas	6,608.49	-57	72	3	15	-100	290	64	70
Bosque de encino	3,567.58	-29	137	25	21.4	-380	155	-41	124.9
Bosque de táscate	2,047.88	-56	111	36	27.4	-117	250	-19	70.7
Pradera de alta montaña	172.15	-19	8	-6	7	215	351	276	45.1
Tular	59.61	70	83	77	3.5	-65	-52	-58	3.2

*DE=Desviación estándar

Cuadro 5.15.- Diferencia en Déficit y Excesos en el escenario RCP8.5 (2075-2099) con respecto al Estado Base para las distintas coberturas vegetales presentes.

Cobertura	Superficie (ha)	Déficit (mm)				Exceso (mm)			
		Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE
Agricultura de temporal	107,659.97	27	230	144	27.1	-436	154	-97	55.4
Pastizal	13,730.60	24	230	137	29.7	-417	137	-59	69.9
Agricultura de riego	13,460.46	126	253	192	22.1	-198	1	-125	32.2
Vegetación secundaria	12186.81	23	208	126	41.2	-432	181	-74	84.2
Bosque de coníferas	6,608.49	6	210	64	36.4	-134	276	11	73
Bosque de encino	3,567.58	30	215	125	31.3	-441	138	-102	130.1
Bosque de táscate	2,047.88	20	235	140	39.1	-151	201	-54	68.7
Pradera de alta montaña	172.15	4	52	15	10.1	177	319	258	48.4
Tular	59.61	191	204	198	3.5	-90	-75	-81	4.2

*DE=Desviación estándar

Es interesante observar que para todos los escenarios las coberturas de bosque de coníferas y pradera de alta montaña serán las menos impactadas en los incrementos del déficit de humedad e incluso son los únicos tipos de vegetación que manifiestan incrementos en el volumen de excesos con respecto al estado base, lo cual es algo positivo en primer lugar, considerando los impactos negativos a esperarse en el resto de usos del suelo. Aunque este tipo de coberturas se distribuyen

en las elevaciones de la subcuenca donde las pendientes son más pronunciadas y un exceso de humedad significa un mayor potencial erosivo de los escurrimientos.

Ya que las sequías en bosques templados propician las condiciones para el desarrollo de insectos descortezadores, es de preverse que una reducción de precipitación e incremento en las temperaturas debido al cambio climático, aumente el riesgo de brotes epidémicos (Cervantes-Martínez *et al.*, 2019). Mientras que las nuevas condiciones climáticas podrán condicionar la distribución de nichos ecológicos de especies forestales, Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019) obtuvieron una reducción potencial hacia 2041-2060 de 11.7% a 26.9% para *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. De igual manera Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) reportan una reducción de 16 y 40 % de áreas idóneas para la distribución de especies de *Pinaceae* hacia los periodos 2015-2039 y 2075-2099 en el estado de Michoacán, siendo *Abies religiosa*, *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote* las más afectadas.

Es adecuado tener presente que los cambios por presentarse son variables en su distribución temporal y espacial dentro de la subcuenca, es así que las zonas con mayores impactos negativos se concentran al norte en porciones de los municipios de Tlaxco y Atlangatepec, al centro con fracciones de los municipios de Tetla, Apizaco y Yauhquemehcan, y al sur-suroeste sobre superficie de Tlaxcala, Panotla, Ixtacuixtla, Nopalucan, Teacalco, Texoloc, Axocomanitla, Tetlatlahuca y Zacatelco. Consecuencias importantes al considerar que en la región sur se concentra la mayor parte de la población y superficie de agricultura de riego de la subcuenca, representando una demanda de agua del 88% del total para el área de estudio de acuerdo con Suárez-Sánchez *et al.* (2008).

Las zonas serranas de mayor elevación de los municipios de Tlaxco, Ixtacuixtla y Panotla, así como la poligonal del Área Natural Protegida Parque Nacional La Malinche estarán sujetas a modificaciones positivas en cuanto a la cantidad de precipitación a esperarse de manera generalizada en todos los escenarios, lo cual supone en primer lugar un escenario favorable al no preverse estrés hídrico por parte de la vegetación; sin embargo, incrementos en los volúmenes precipitados también significan un potencial incremento en los escurrimientos producidos por lo que sumado a las marcadas pendiente se genera el riesgo de erosión hídrica. La atención de la preservación de las propiedades estructurales del suelo, así como de la conservación de la cubierta vegetal serán de gran importancia. La implementación de obras de conservación de suelo y agua

deberá de ser evaluado mediante estudios con mayor profundidad, con atención a la dinámica de escurrimientos superficiales y de eventos extraordinarios, lo cual debe sumarse a las problemáticas actuales que representan la tala ilegal y las afectaciones causadas por el gusano descortezador, plaga que se ha extendido en los últimos años en todos los bosques de la entidad.

6. CONCLUSIONES

Durante el intervalo comprendido entre la elaboración de las Series II y VI de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, 1993-2014 los procesos de cambio de uso de suelo fueron constantes, resaltando la perturbación de hasta 1,769 ha de bosques, las cuales solo consideran afectaciones en su estructura y composición (degradación), pues dicha superficie no contempla la conversión de 1,256 ha de bosques primarios y las 2,555 ha de vegetación secundaria de bosques a algún tipo de agricultura. Cambios notables muestran los pastizales inducidos, con una conversión de 256.78 ha de vegetación primaria y secundaria de bosque a este tipo de cobertura, aunque de la misma manera 4,544 ha de pastizales inducidos cedieron ante el incremento de la frontera agrícola. Resaltan de igual manera las 1,389 ha destinadas a la agricultura que fueron convertidas a uso urbano, o las 379 ha agrícolas que aparentan una recuperación a ecosistemas de bosques, lo que requiere de un mayor análisis para verificar tal comportamiento.

Considerando el periodo de referencia 1984-2013, el volumen de precipitación total anual en la subcuenca es de 1,193.76 hm³, con un comportamiento en las láminas reportadas a lo largo del territorio de 579 mm como mínima, máxima de 1,053 mm y un promedio de 724 mm. Por su parte, la temperatura media anual de la subcuenca es de 13.6 °C, aunque con un intervalo de 4.7 y 23.6 °C como temperaturas medias anuales mínima y máxima en la zona de estudio. El empleo del método del Balance Hídrico Climático de Thornthwaite y Mather en la subcuenca del río Zahuapan arrojó resultados aceptables al tratarse de un método relativamente poco exigente de insumos para su ejecución, el cual ha sido considerado en la bibliografía como una alternativa eficaz para emplearse en zonas poco estudiadas o cuyos registros hidrométricos sean escasos para la implementación de otros modelos hidrológicos.

Para el estado de referencia se observa un periodo húmedo bien definido entre junio y octubre, donde el resto de meses debe de considerarse seco al ser mayor la evapotranspiración potencial a la precipitación reportada. Finalmente, se obtuvo un valor de 906.38 hm³ como

evapotranspiración real, lo que corresponde al 76 % de la precipitación total en la subcuenca, así como un déficit y exceso de humedad anual de 212.54 y 288.19 hm³ respectivamente. De esta manera, el territorio queda dominado por un clima del tipo subhúmedo húmedo de acuerdo a la clasificación climática por índice de humedad de Thornthwaite.

Para esta investigación, se eligieron los RCP4.5 y RCP8.5 entre cuatro escenarios disponibles, siendo los empleados más comúnmente en la literatura al considerar que el escenario RCP2.6 al ser el más optimista en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero de todos ellos es desafortunadamente difícil de alcanzarse considerando la realidad de emisiones de GEI actual. El escenario RCP4.5 asume que las emisiones anuales globales medidas en equivalentes de CO₂ alcanzan su punto máximo alrededor del año 2060 con una estabilización de las concentraciones de GEI y aerosoles a partir de entonces, lo cual conduce a un forzamiento radiativo adicional igual a 4.5W/m², mientras que bajo el escenario RCP8.5 las emisiones continuarían aumentando durante todo el siglo conduciendo a un incremento de 8.5 W/m² al final del siglo XXI con respecto al clima preindustrial, en consecuencia el RCP4.5 puede considerarse como un escenario conservador mientras que el RCP8.5 es una alternativa más pesimista.

La tendencia de cambio en la temperatura es similar y constante a lo largo del año para los tres MCG considerados, para el futuro cercano (2015-2039) se esperan incrementos promedio en la temperatura media anual de 1.47 °C bajo el escenario RCP4.5 y de 1.56 °C en el escenario RCP8.5, mientras que en el horizonte lejano la condición es más alarmante con incrementos promedio de 3.19 y 5.16 °C, respectivamente. Por su parte, el comportamiento de la precipitación difiere al mostrar cambios positivos bajo los modelos HADGEM y MPI, mientras que en el modelo GFDL éstos son negativos, resultando en cambios con respecto al volumen anual del periodo de referencia que oscilan entre -7.13 y 13.56 % bajo escenario RCP4.5 y -7.38 a 10.16 % en el escenario RCP8.5 hacia el horizonte cercano, y de -6.12 a 8.09 % y -11.82 a 8.62 % respectivamente en el horizonte lejano. Aunque debe prestarse mucha atención a que estos aumentos corresponden a incrementos en la precipitación en el periodo enero-agosto en el futuro cercano y acotándose en el lejano a los meses abril-agosto, manifestándose reducciones para el resto del año con respecto al estado base.

Se prevén incrementos promedio en el volumen anual del déficit de humedad en el horizonte cercano para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 de 42.9 y 33.5% respectivamente y de

76.3 y 116.1 % hacia el horizonte lejano. Las principales consecuencias de estos cambios se reflejan en el estrés hídrico al cual se verá expuesta la cobertura vegetal, siendo los bosques de encino y táscate la vegetación natural que será sometida a un mayor déficit hídrico. La actividad agrícola se verá seriamente afectada al verse incrementada la lámina del déficit hídrico de los 225 mm en promedio que representa actualmente para la agricultura de temporal a 369 y 361 mm en los horizontes cercano y lejano respectivamente bajo RCP4.5, mientras que para el escenario RCP8.5 se vuelve de 411 y 455 mm, lo cual potencialmente afectará el desarrollo de los cultivos bajo este modelo de producción. Igual de severos son los impactos en la agricultura de riego, donde actualmente el volumen anual de agua calculado para satisfacer el déficit de humedad es de 22 hm³ (la CONAGUA reporto 22.64 hm³ de agua superficial otorgados en el Distrito de Riego 056: Atoyac-Zahuapan), el cual deberá incrementarse 9.92 y 8.33 hm³ en el horizonte cercano y lejano respectivamente bajo el escenario RCP4.5, y en 13.71 y 23.83 hm³ bajo RCP8.5 para solventar las necesidades hídricas, es decir que la cantidad de agua destinada a riego agrícola puede duplicarse hacia finales de siglo en el peor de los escenarios.

Por su parte, la variable excesos de humedad la cual concentra el agua que es susceptible de convertirse en escurrimientos superficiales, flujos subterráneos que contribuyan al caudal base de las corrientes perenes, así como recarga al acuífero, podría verse reducida en promedio 26.6 y 22.5 % hacia el horizonte cercano en el escenario RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente, situación que se agrava en el horizonte lejano al ser de 35.6 y 50.4 % las reducciones con respecto al estado de referencia.

Bajo los escenarios de cambio climático evaluados la tendencia general para la subcuenca corresponde a condiciones de mayor aridez, lo cual podría conducir hacia procesos de desertificación, impactos en las actividades productivas y la transición de las coberturas vegetales hacia otros tipos menos demandantes de agua.

7. RECOMENDACIONES

Una caracterización climática de la subcuenca bajo escenarios de cambio climático al considerar solamente los valores presentes en las ubicaciones de las estaciones meteorológicas empleadas, genera una sobreestimación del valor de la temperatura media mensual y una subestimación de la lámina promedio de precipitación. Lo cual es atribuible a la distribución de

las estaciones meteorológicas generalmente en los llanos y valles del área de estudio, lo que excluye las características y comportamiento de las variables meteorológicas propias de las laderas y elevaciones. Para el desarrollo de balances hídricos espacialmente distribuidos, se recomienda hacer uso de recursos con un alto grado de detalle espacial de las variables climatológicas, o la implementación de metodologías de interpolación adecuadas a la zona de interés.

Considerando la potencialidad de percibirse mayores precipitaciones y por consiguiente una mayor cantidad de excedentes de humedad en las regiones serranas de la subcuenca, se recomienda realizar mayores análisis de los riesgos de reblandecimiento del terreno, deslaves y erosión hídrica que pudieran presentarse para considerar la pertinencia de realizar obras de conservación de suelo y agua.

La tendencia marcada a una severidad del estrés hídrico por parte de los cultivos agrícolas en todos los escenarios debe servir como elemento de consideración en la búsqueda de incentivar la ejecución de nuevas prácticas culturales como la agricultura de conservación, y la transición así variedades de cultivos que puedan adaptarse a las nuevas condiciones climatológicas potenciales.

8. LITERATURA CITADA

- Abad, C. (2006)** Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Tecnológico de Monterrey. México. 274 pp
- Aguayo, M., Stehr, A. & Link, O. (2016)** Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala a escenarios futuros de expansión forestal. Revista de la Gran Geografía del Norte. Vol. 65. Pp. 197-214.
- Allam, A., Moussa, R., Najem, W., & Bocquillon, C. (2019)** Mediterranean Specific Climate Classification and Future Evolution Under RCP Scenarios. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. Pp 1-25
- Álvarez-Pérez, A., Villavicencio-García, R., Ruiz-Corral, J.A., & Santiago-Pérez, A.L. (2020)** Efecto del cambio climático a partir de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 del año 2050 en el balance hídrico del Área Natural Protegida La Primavera, Jalisco, México. Áreas Naturales Protegidas Scripta. Vol. 6 (1). Pp 53-74.
- Azizian, A. & Shokoohi, A. (2015)** Effects of data resolution and stream delineation threshold area on the results of a kinematic wave based GIUH model. Water SA, Vol. 41. Núm. 1. Pp 61-70
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre. J.E. (2020)** La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la

acción? Libros de la CEPAL, N° 160. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Chile. 375 p.

Bohn, V.Y. & Campo, A.M. (2010) Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas no aforadas en Corrientes, Argentina. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 71. Pp. 31-42

Brooks, K.N., Ffolliot, P.F., Gregersen, H.M., & Thames, J.L. (1991) Hydrology and the management of watersheds. 1ra edición. Iowa State University Press. Ames, Iowa, EUA. 392 pp

Burgos, A.L. & Bocco, G. (2015) La cuenca hidrográfica como espacio geográfico. En: Dimensiones sociales en el manejo de cuencas. Burgos, A., Bocco, G. y Sosa-Ramírez, J. (Coordinadores). UNAM/CIGA. México. 308 p.

Cabrera, J. (Última actualización: Julio 2017) Unidad de Respuesta Hidrológica [H.R.U.] Artículo publicado en el portal del Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño – Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Disponible en: <http://www.imefen.uni.edu.pe/>

Calvo, J.C. (1986) An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. Hydrological Sciences Journal. Vol. 31. Pp 51-60

Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. & Schulze, E.D. (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia. Núm. 108. Pp 583-595

Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J., & Castruita-Esparza, L. U. (2019) Historical bark beetle outbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1895-2015) and their relationship with droughts. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 25. Núm. 2. Pp 269-290.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018) Estadísticas del Agua en México, edición 2018. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Planeación. 303 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Alto Atoyac (2901), estado de Tlaxcala. Subdirección General Técnica; Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México. Diciembre 2020. 30 pp

Conde-Álvarez, A.C., Enríquez-Hernández, G., Esquivel-Esquivel, N., López-Blanco, J., López-Díaz F., Montes-Rojas R., Nava-Assad Y. & Ruíz-Bedolla K. (2016) Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. En: Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y El Caribe: Coordinadores Ana Cecilia Conde Álvarez y Jorge López Blanco. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Pp 25-72

- Consejo Mundial del Agua (2020)** World Water Vision – Visión Mundial del Agua; Que el agua sea asunto de todos. Editores en jefe: William J. Cosgrove & Frank R. Rijsberman. World Water Council. Earthscan Publications. 108 pp
- Cortez-Yacila, H. & Rojas-Contreras, J. (2021)** Una aproximación al conocimiento del cambio de uso de suelo en el estado de Tlaxcala. En: Grandes retos de Tlaxcala. Coordinadores: Angélica Cazarín Martínez y Héctor Manuel Cortez Yacila. 1ra Edición, El Colegio de Tlaxcala A. C., México.
- Cotler-Avalos, H. & Pineda-López, R. (2008)** Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos? Boletín del Archivo Histórico del Agua. Vol.13. Núm. 39. Pp 16-21
- Cotler-Ávalos, H., Galindo-Alcántar, A., González-Mora, I.D., Pineda-López, R.F. & Ríos-Patrón, E. (2013)** Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Cuadernos de divulgación ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 31 p.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & López-Sandoval, J. A. (2016).** Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 22. Núm. 2. Pp. 135-148.
- Del Toro-Guerrero, F.J., Kretschmar, T. & Hinojosa-Corona, A. (2014)** Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V. Núm. 6. Pp 69-81
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payán, J., Watts-Thorp, C., & Cruz-Medina, I. R. (2008)** Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. Agricultura Técnica en México Vol. 34, Núm. 3. Pp 279-287
- Dourado-Neto, D., de Jong van Lier, Q., Metselaar, K., Reichardt, K. & Nielsen, D.R. (2010)** General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. Scientia Agricola. Piracicaba, Brasil. Vol. 67, Núm. 1. Pp 87-95
- Dunne, T. & Leopold, L.B. (1978)** Water in Environmental Planning. Freeman, New York. 818 pp
- Fernández-Eguiarte, A., Romero-Centeno, R., & Zavala-Hidalgo, J. (2014)** Metodologías empleadas en el atlas climático digital de México para la generación de mapas de alta resolución. Geoacta. Vol. 39. Núm. 1. Pp. 165-173.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017)** Watershed management in action – lessons learned from FAO field projects. Rome. 154 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2019)** Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. Suiza. 28 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2007)** Why invest in watershed management. Rome. 31 pp.

- Gaspari, F.J., Rodríguez-Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., & Besteiro, S.I. (2013)** Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. 1a edición. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 188 pp
- Gaspari, F.J., Rodríguez-Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., & Besteiro, S.I. (2012)** Caracterización morfométrica de cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. Vol. 4. Pp 143-158
- Gerbaux, M., Hall, N., Dessay, N. & Zin, I. (2009)** The Sensitivity of Sahelian Runoff to Climate Change. *Hydrological Sciences; Journal–des Sciences Hydrologiques*, Vol. 54:1. Pp 5-16
- Gómez-Díaz, J. D., Etchevers, J.D., Monterroso, A.I.; Gay, C., Campo, J. & Martínez, M. (2008)** Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*. Vol. 21. Núm. 1. Pp 35-56
- González-Jácome, A. (2009)** El control del agua en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan por el Estado Mexicano Posrevolucionario. *Anduli - Revista Andaluza de Ciencias Sociales*; Vol. 8. Pp 169-190
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M.A., Vázquez-Alarcón, A. & Ruíz-Puga, P. (2013)** Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 19. Núm. 1. Pp. 45-66.
- Guido-Aldana, P.A. (2017)** Cambio climático: selección, clasificación y diseño de medidas de adaptación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 96 p.
- Hasan, E., Tarhule, A., Kirstetter, P.E., Clark, R. & Hong, Y. (2018)** Runoff Sensitivity to Climate Change in the Nile River Basin. *Journal of Hydrology*. Vol. 561. Pp 312-321
- Horton, R. E. (1932)** Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 13. Núm. 1. Pp 350-361
- Horton, R.E. (1945)** Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. Vol. 56. Pp 275-370
- Huang, Y., Ma, Y., Liu, T., & Luo, M. (2020)** Climate Change Impacts on Extreme Flows Under IPCC RCP Scenarios in the Mountainous Kaidu Watershed, Tarim River Basin. *Sustainability* 12. Núm. 5, 2090. 23 pp
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2017)** Escenarios de cambio climático. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126> Consultado al 29 de mayo de 2019.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2018)** ¿Qué es el cambio climático? Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-cambio-climatico> Consultado al 29 de mayo de 2019.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (s.f.)** Modelos Digitales de Elevación (MDE) – Descripción. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001)** Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional Serie I. Sistema topofomas. Escala 1:1,000,000. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2008)** Conjunto de datos vectoriales escala 1:1,000,000. Unidades climáticas. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017)** Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017. Gobierno del Estado de Tlaxcala – INEGI. México. 577 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007)** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., y Miller H.L. (Editores), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York. NY, Estados Unidos. 996 pp
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014)** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Lexow, C. (2002)** Hidrodinámica de la zona no saturada aplicada al estudio del Balance Hidrológico y de contaminantes de los recursos hídricos subterráneos (Cuenca del Arroyo del Águila). Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina. 175 pp
- Leyva-Reyes, J.C. & Herrera-Herrera B. (2003)** Análisis de la dinámica territorial en México y su interrelación con la dinámica poblacional, periodo 1980-2000. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 9. Núm. 1. Pp 77-87
- Litan-Kumar, R. (2018)** Limitation of automatic watershed delineation tools in coastal region. Annals of GIS. Vol. 24, No. 4. Pp 261-274
- López-Cadenas de Llano, F. & Mintegui-Aguirre, J.A. (1987)** Hidrología de superficie. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 222 pp
- López-Lambrano, A.A., Martínez-Acosta, L., Gámez-Balmaceda, E., Medrano-Barboza, J.P., Remolina López, J.F. & López-Ramos, A. (2020)** Supply and Demand Analysis of Water Resources. Case Study: Irrigation Water Demand in a Semi-Arid Zone in Mexico. Agriculture. Vol. 10. Núm. 333.
- Maderey, L.E., Jiménez, A. & Carrillo, J.J. (2013)** Global climate change and its effect on hydrological resources of Mexico's central region. Scientific Annals of "Alexandru Ioan Cuza" University of Iași. Geography series Vol. LIX. Núm. 1.
- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, Ó.A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E.J., & Yerena-Yamallel, J.I. (2019).** Distribución actual y futura del bosque subalpino de Pinus hartwegii Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. Madera y Bosques. Vol. 25. Núm. 2.
- Martín-Clemente, C.R., Sosa-Ramírez, J., Maass-Moreno, M., Luna-Ruíz, J.J., Meráz-Jiménez, A.J. & Flores-Ancira, E. (2015)** Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. Revista Terra Latinoamericana. Vol. 33. Núm. 1. Pp 17-26

- Martínez-Austria, P.F. & Patiño-Gómez, C. (2012)** Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III. Núm. 1. Pp. 5-20.
- Melo, W.D. (2003)** Génesis del Estuario de Bahía Blanca: Relación Morfodinámica y Temporal con su Cuenca Hidrográfica. Bahía Blanca. Argentina, 202 pp
- Mendoza, V.M., Villanueva, E.E. & Adem, J. (1997)** Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate research*. Vol. 9. Pp. 139-145.
- Miao-Wu, P.S., Ang-Chen, C.S. & Pengyuan, W. (2017)** Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT. *Water SA*. Vol. 43. Núm. 3. Pp 450-462
- Miller, V.C. (1953)** A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee, Dept. of Geology, Columbia University, Contract N6 ONR 271-30, Technical Report 3. Pp 1-30. *America Bull* 69: Pp 279-300
- Mintegui-Aguirre, J.A. & Robredo-Sánchez, J.C. (2008)** Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para la América Latina y el Caribe. PHI – VII, Documento Técnico Núm. 13. 162 pp
- Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A. & Sastre-Merlín, A. (2016)** Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management*. Vol. 175. Pp 29-42.
- Mollard, E. & Vargas, S. (2005)** Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México, IMTA-IRD. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Comunicación, Participación e Información. México. 386 pp
- Monterroso-Rivas, A.I. & Gómez-Díaz, J.D. (2021)** Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana* Vol. 39. Pp 1-19. e774
- Myo, H., Zin, W., Shwe, K., San, Z., Kawasaki, A. & Acierto, R.A. (2020)** Projecting the Impact of Climate Change on Temperature, Precipitation, and Discharge in the Bago River Basin. *Journal of Disaster Research*. Vol. 15. Núm.3. Pp 324-333
- Nugroho, A.R., Tamagawa, I., Riandraswari, A. & Febrianti, T. (2019)** Thornthwaite-Mather water balance analysis in Tambakbayan watershed, Yogyakarta, Indonesia. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 280. Núm. 3. (05007)
- Olaiz, A. H., Singhar, S. H., Vann, J. D., & Houston, S. L. (2018)** Comparison and Applications of the Thornthwaite Moisture Index Using GIS. *PanAm Unsaturated Soils 2017: Applications: GSP 302*. Pp. 280-289
- Ortega-Gaucin, D., Velasco-Velasco, I., López-Pérez, M. & Cardoso-García, J. (2014)** Program of Preventive and Mitigation Drought Measures of the Rio Balsas Basin Council

(PPMDM-RBBC). International Conference on Hydro-meteorological Risks and Climate Change. November 12-14, 2014, Cholula, Puebla, Mexico

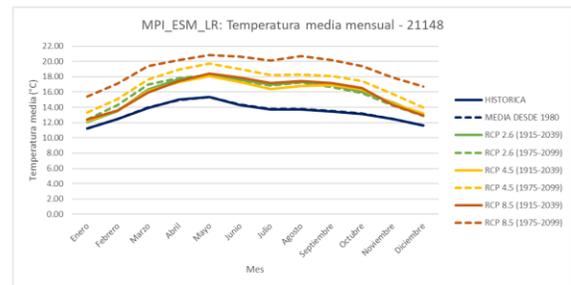
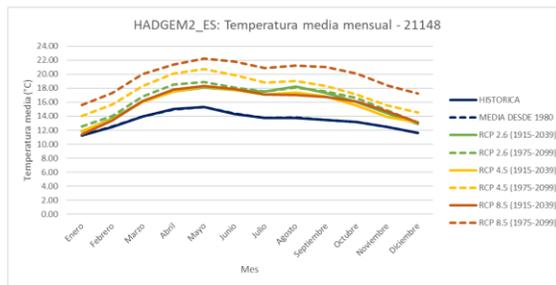
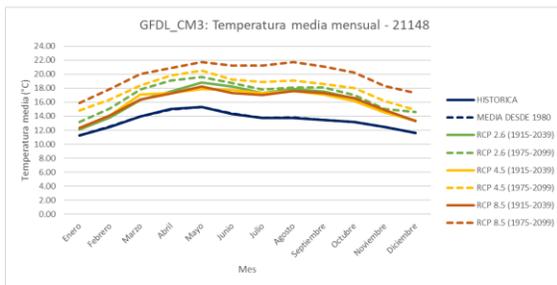
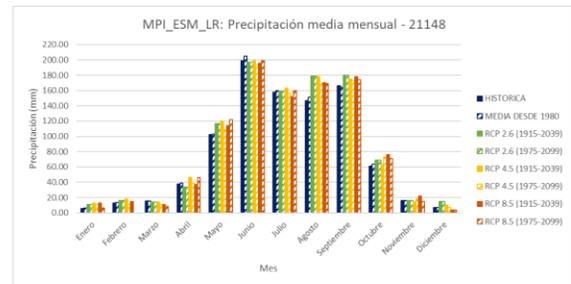
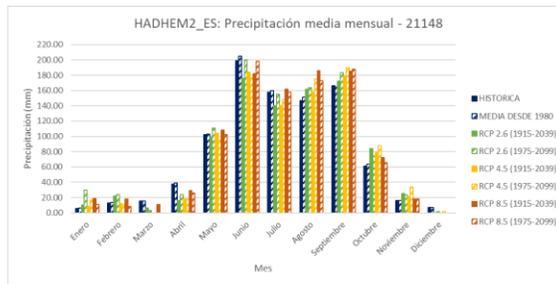
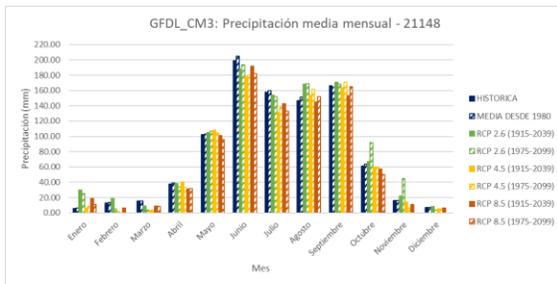
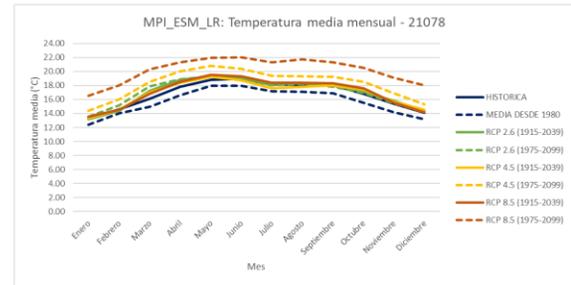
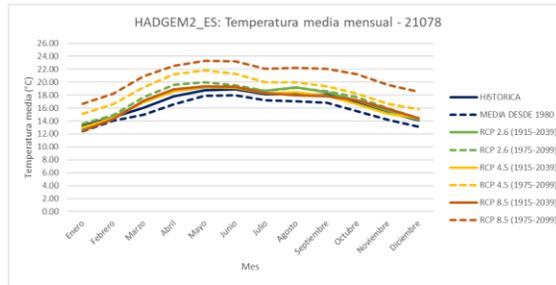
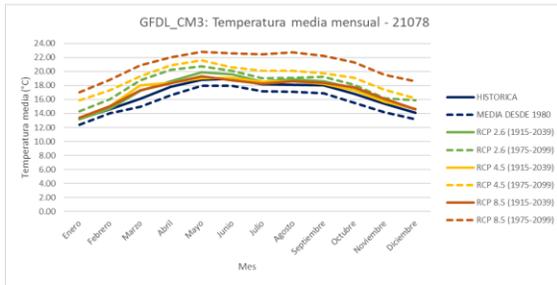
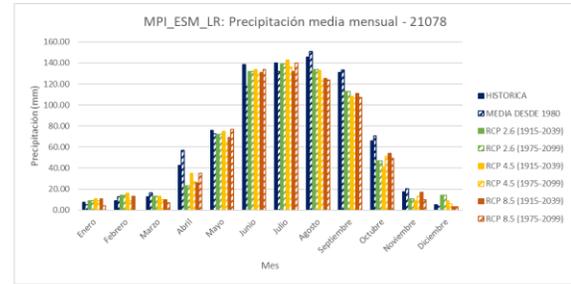
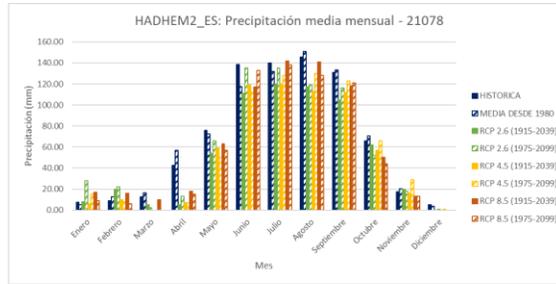
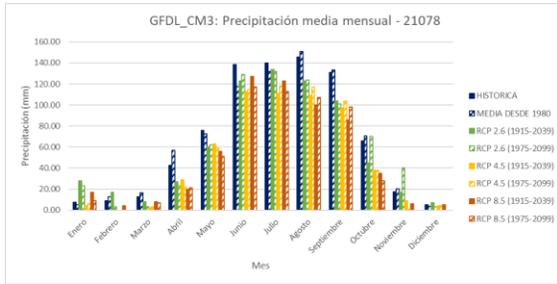
- Ortiz-Solorio, C. A. (1987)** Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 327 pp.
- Pagiola, S., Bishop, J. & Landell-Mills N. (compiladores) (2006)** La venta de servicios ambientales forestales Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. 459 pp
- Rasilla, D.F., Garmendia, C. & García-Codron, J.C. (2012)** Climate change projections of streamflow in the Iberian peninsula, International Journal of Water Resources Development. Vol. 29. Núm. 2. Pp 184-200.
- Rodríguez-Huerta, Edgar; Rosas-Casals, Martí; y Hernández-Terrones, Laura Margarita (2019)** A water balance model to estimate climate change impact on groundwater recharge in Yucatan Peninsula, Mexico, Hydrological Sciences Journal. Vol. 65. Núm. 3. Pp 470-486
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M.A., Ontiveros-Capurata, R.E.; & López-López, R. (2012)** Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. Revista Universidad y Ciencia – Trópico Húmedo. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Vol. 28. Núm.1. Pp 1-14
- Ruiz-Corral, J.A., Medina-García, G., Rodríguez-Moreno, V.M. Sánchez-González, J.J., Villavicencio-García, R., Durán-Puga, N., Grageda-Grageda, J. & García-Romero, G.E. (2016)** Regionalización del cambio climático en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Núm. 13. Pp 2451-2464.
- Rzedowski, J. (1990).** Vegetación Potencial. IV.8.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4,000,000. Instituto de Geografía, UNAM. México
- Saha, S., Hariharan, N., Gu, F., Luo, X., Little, D. N., & Lytton, R. L. (2019)** Development of a mechanistic-empirical model to predict equilibrium suction for subgrade soil. Journal of Hydrology. Vol. 575. Pp 221–233
- Salinas-Prieto, J.A., Colorado-Ruiz, G. y Maya Magaña, M.G. (2015)** Escenarios de cambio climático para México. En: Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Felipe I. Arreguín Cortés, Mario López Pérez, Olivia Rodríguez López y Martín José Montero Martínez (coordinadores). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 148 p.
- Santillán-Fernández, A., Cruz-Ramírez, S.Z., Calva-Castillo, A., Ireta-Paredes, A.R. & Bautista-Ortega, J. (2020)** Balance hídrico climático de bosque mesófilo de montaña en la huasteca. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. Vol.7. Núm. 1. 9 pp
- Santillán-Gutiérrez, E., Dávila-Vázquez, G., de Anda-Sánchez, J. & Díaz-Torres, J.J. (2013)** Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. Rev. Ambiente & Agua. Vol. 8. Núm. 3. Pp 104-117
- Saxton, K.E. & Rawls, W.J. (1986)** Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. Soil Science Society of America Journal. Vol. 50. Pp 1031–1036

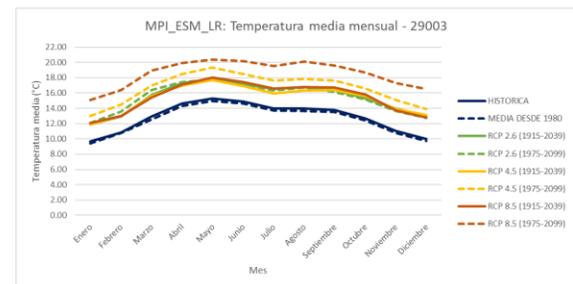
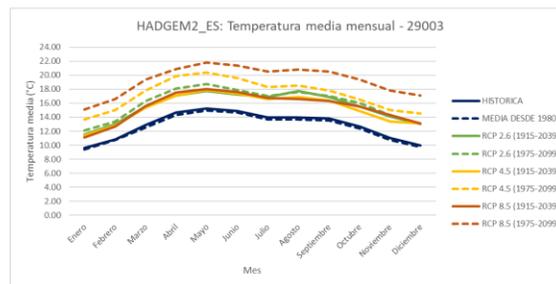
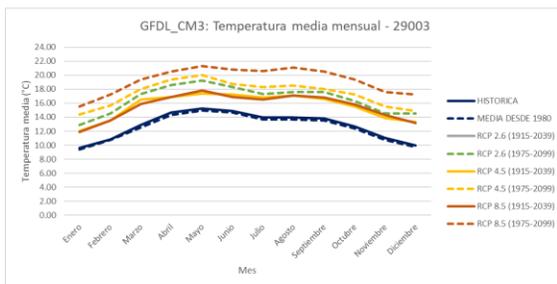
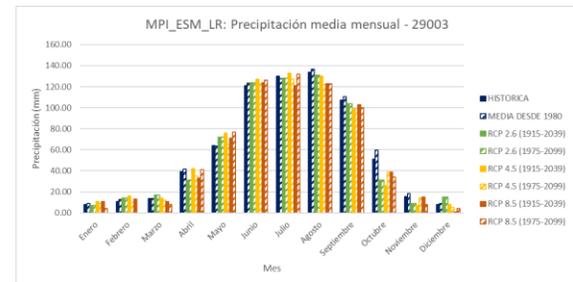
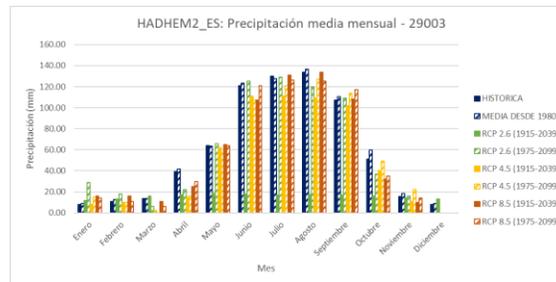
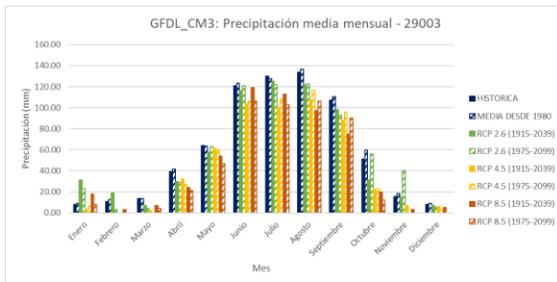
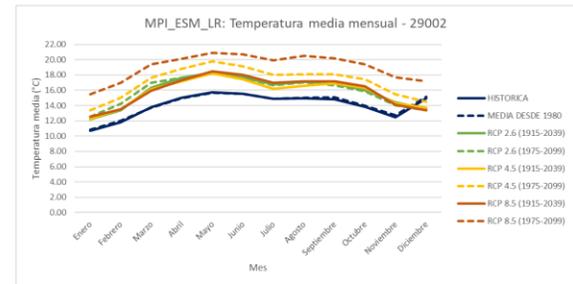
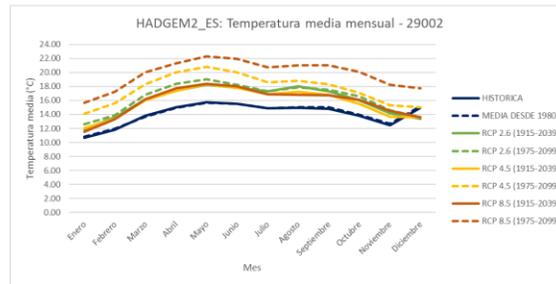
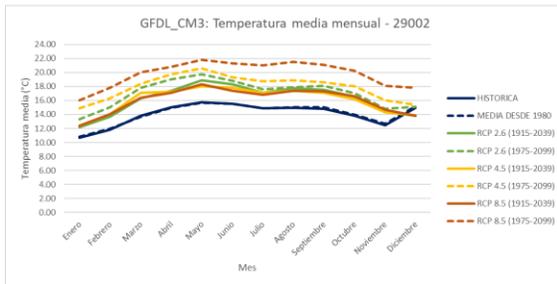
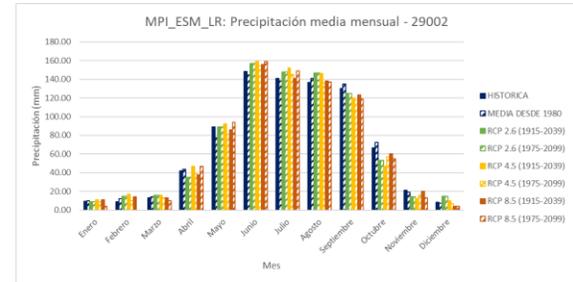
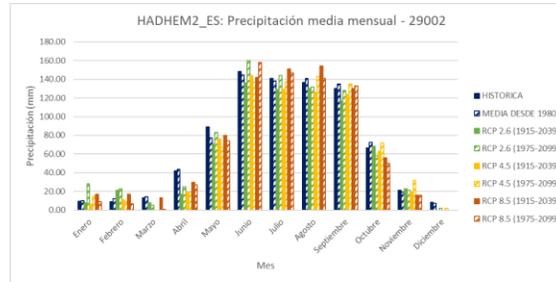
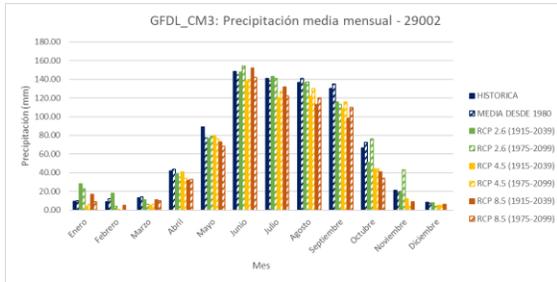
- Schumm, S.A. (1956)** Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, Vol. 67. Pp 597-646
- Scozzafava, M. & Tallini, M. (2001)** Report: Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. Hydrogeology Journal. Vol. 9. Pp 461–475
- Suárez-Sánchez, J., Muñoz-Nava, H., Orozco-Flores, S., Sánchez-Torres Esqueda, G., Ritter-Ortíz, W., Carreón-Coca, M.F., Muñoz Castañeda, M.L. & Treviño-Trujillo, J.M. (2008)** Impacto del cambio climático global en la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. Avances en Recursos Hidráulicos. Núm. 17. Pp. 25-31.
- Thornthwaite, C. W. (1948)** An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review. Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948) Pp. 55-94
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1957)** Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Publications of Climatology. Vol. 10. Núm. 3. Pp 185–311
- Treitz, P. & Rogan, J. (2004)** Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. Progress in Planning. Vol. 61. Pp 269-279
- Unión Mundial para la Naturaleza (UICN) (2000)** Visión del Agua y la Naturaleza: Estrategia Mundial para la Conservación y Manejo Sostenible de Recursos Hídricos en el Siglo XXI. 7 de febrero de 2000. Traducción al español por: PhD. José María Blanch. 73 pp
- Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT) (2014)** Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático, Estado de Tlaxcala, México. Tomás Morales Acoltzi y Rogelio Bernal Morales (Recopiladores). 260 pp
- Uribe, N. (2010)** Conceptos básicos y guía rápida para el usuario: Versión SWAT 2005. Adaptado de: Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation. Grsassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center- Texas Agricultural Experiment Station. Temple – Texas, USA. 47 p.
- Velázquez-Zapata J.A., Troin, M. & Dávila-Ortiz R. (2017)** Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Indicadores Hidrológicos de una Cuenca del Centro de México con Base en un Ensamble de Modelos Climáticos y en el Modelo Hidrológico SWAT. Ingeniería Investigación y Tecnología. Volumen XVIII. Núm. 3. Pp 341-351
- Wang, J., Hu, L., Li, D., & Ren, M. (2020)** Potential Impacts of Projected Climate Change under CMIP5 RCP Scenarios on Streamflow in the Wabash River Basin. Advances in Meteorology, 2020. Pp 1-18.
- Westenbroek, S.M.; Kelson, V.A.; Dripps, W.R.; Hunt, R.J.; y Bradbury, K.R., (2010)** SWB—A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge: U.S. Geological Survey. Techniques and Methods 6–A31, 60 pp.

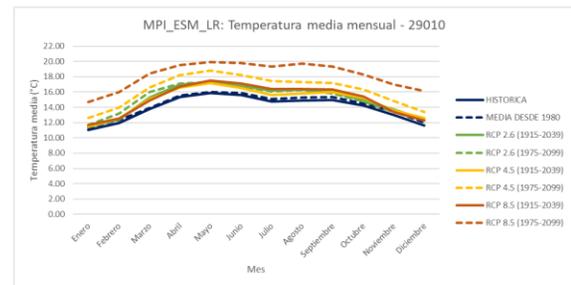
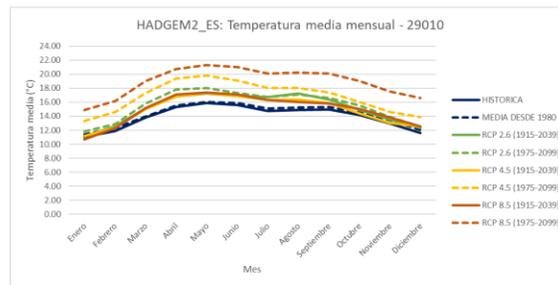
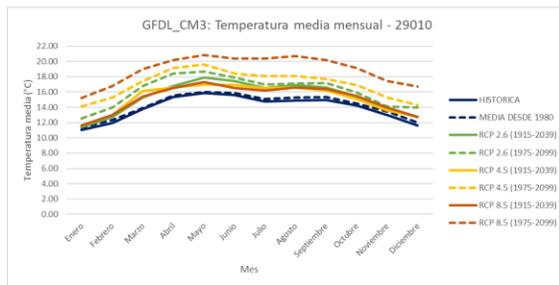
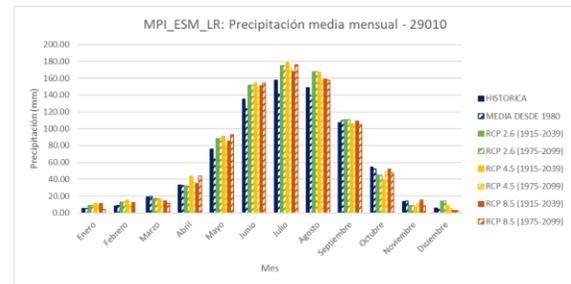
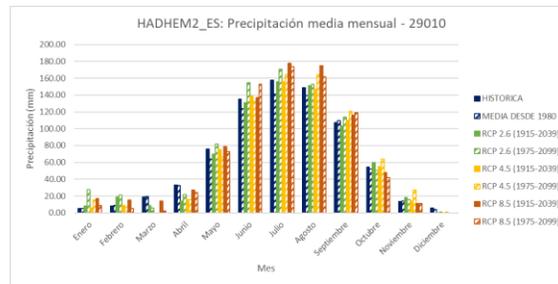
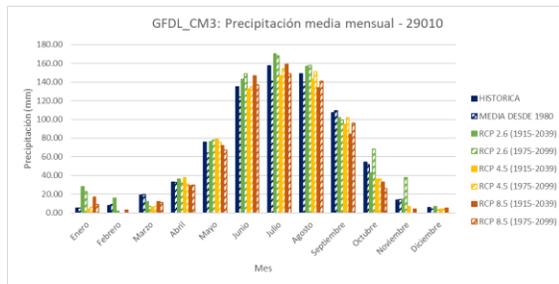
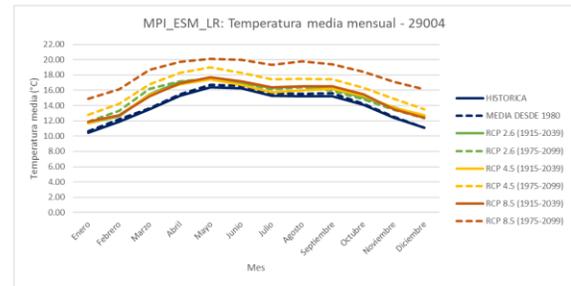
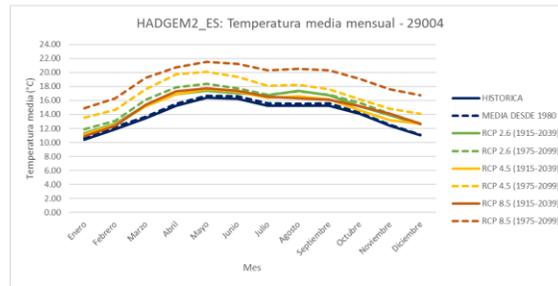
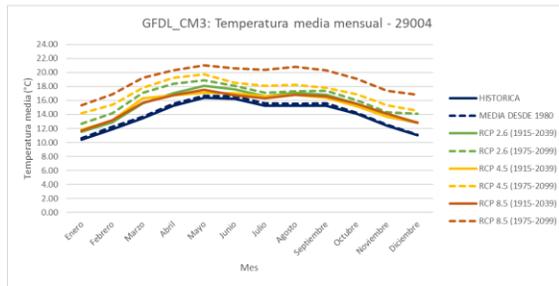
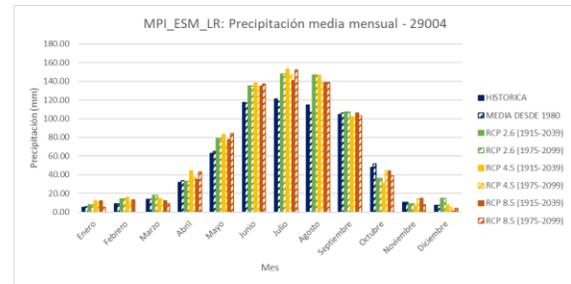
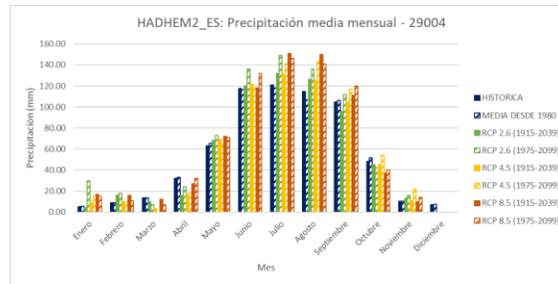
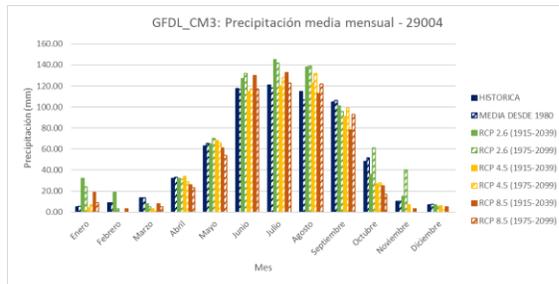
- Witczak, M.W., Zapata, C.E. & Houston, W.N. (2006)** Models Incorporated into the Current Enhanced Integrated Climatic Model for Used for Version 1.0 of the MEPDG, NCHRP 9-23 Project Report. Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Yunxiang, L., Baolin, S., Junying. Y., Hui, L. & Qian, Z. (2011)** GIS Techniques for Watershed Delineation of SWAT Model in Plain Polders. *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 10. Pp 2050-2057.
- Zhang, J. (2021)** Export image to TIF or TIFF file of selected data type. MATLAB Central File Exchange. Disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30519-export-image-to-tif-or-tiff-file-of-selected-data-type>
- Zhao, C., Brissette, F., Chen, Jie. & Martel, J.L. (2019)** Frequency Change of Future Extreme Summer Meteorological and Hydrological Droughts Over North America. *Journal of Hydrology*. Vol. 584.

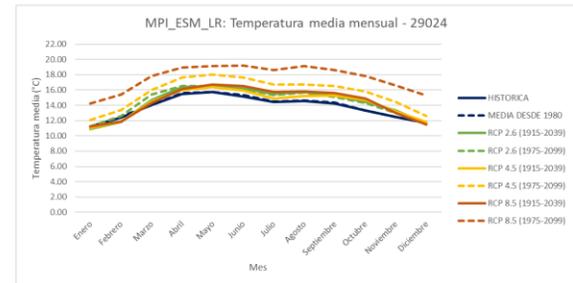
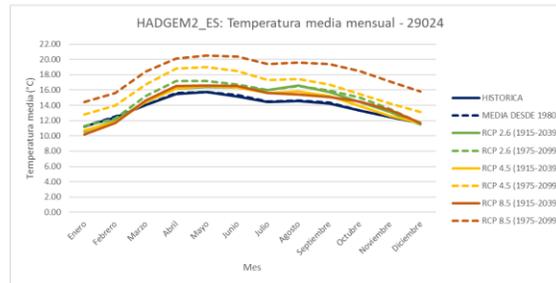
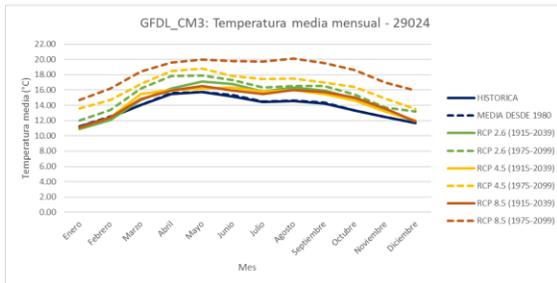
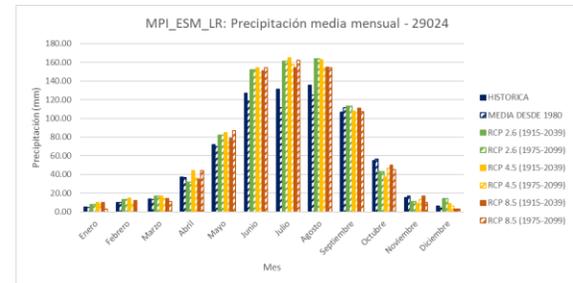
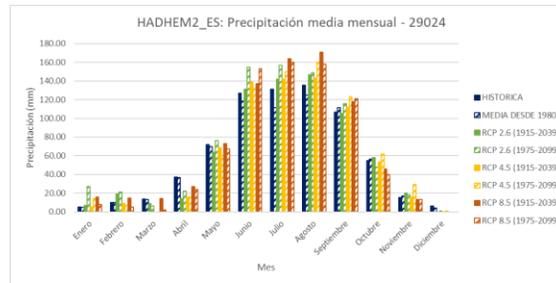
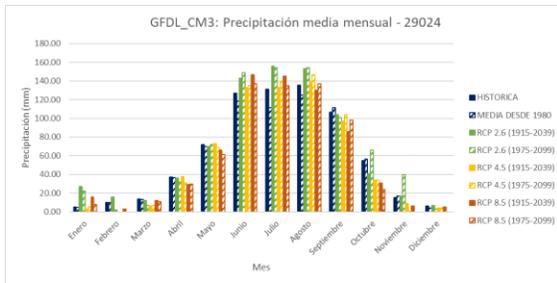
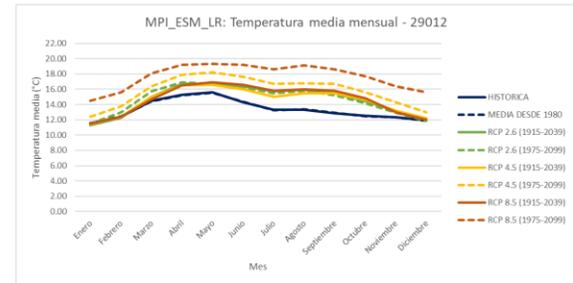
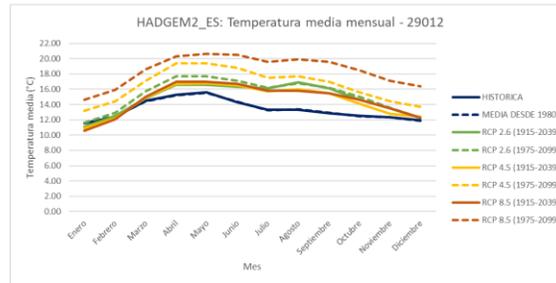
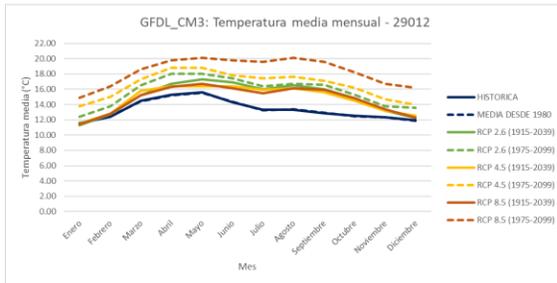
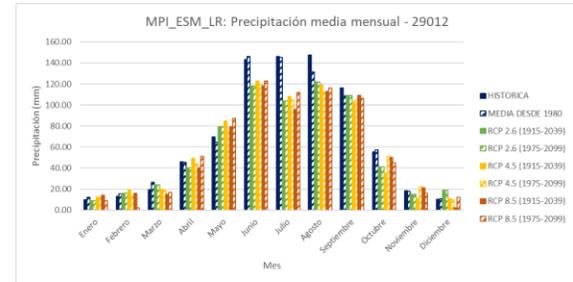
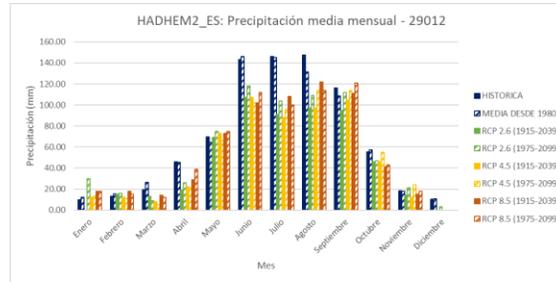
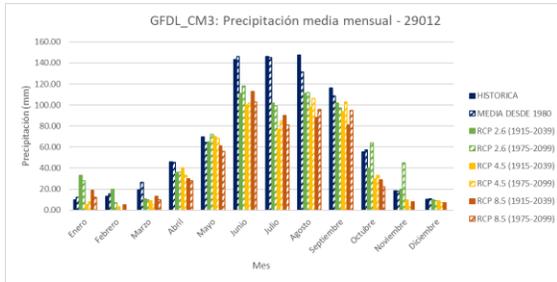
ANEXOS

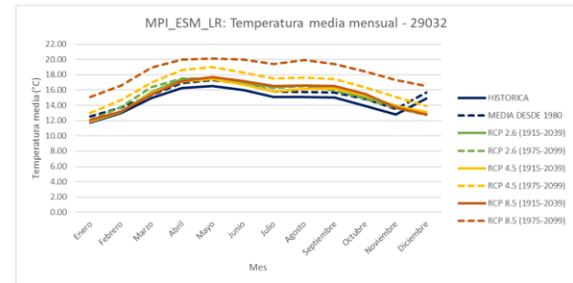
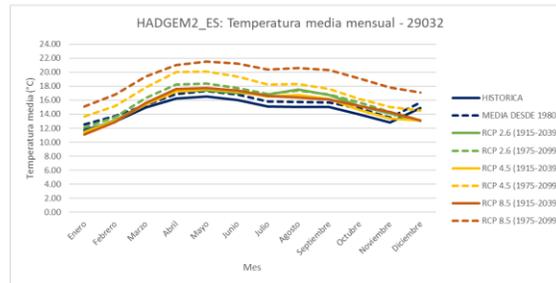
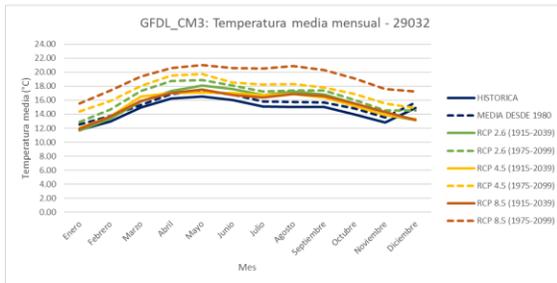
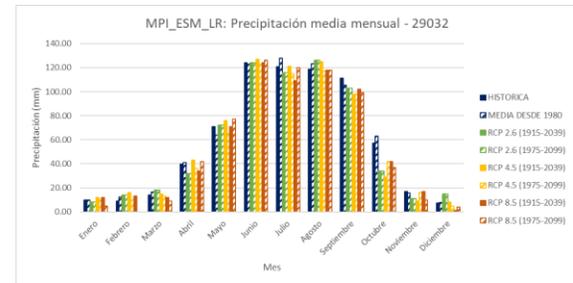
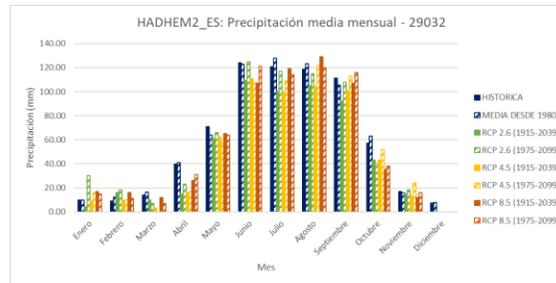
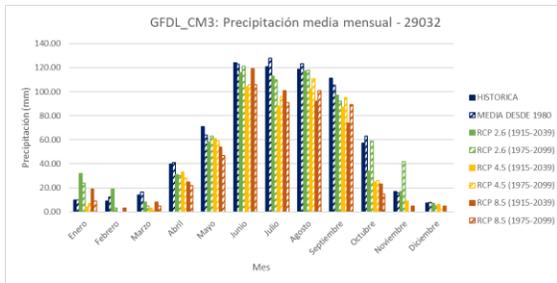
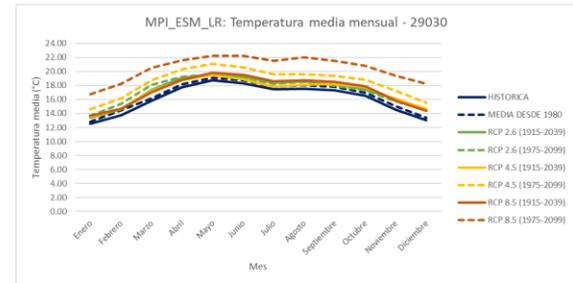
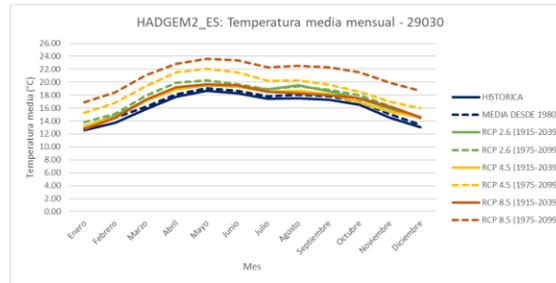
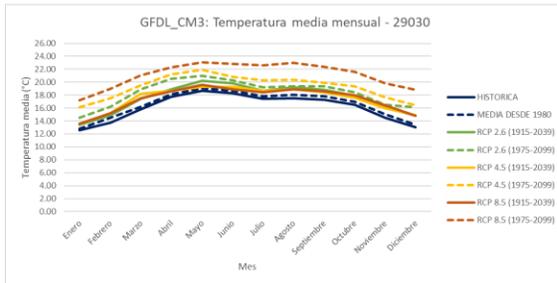
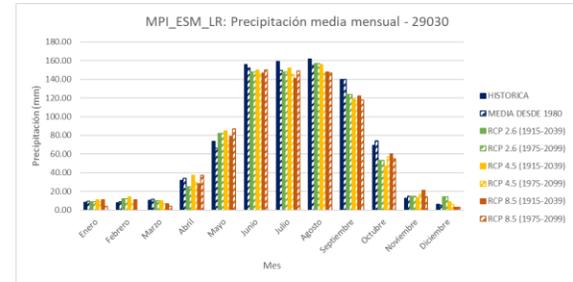
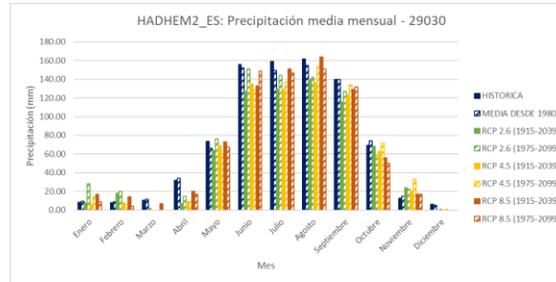
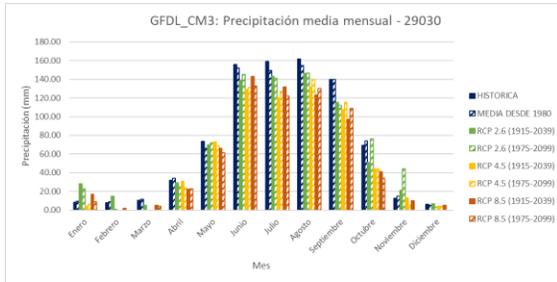
**ANEXO A: GRÁFICOS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES
CLIMATOLÓGICAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA CADA
ESTACIÓN EVALUADA.**

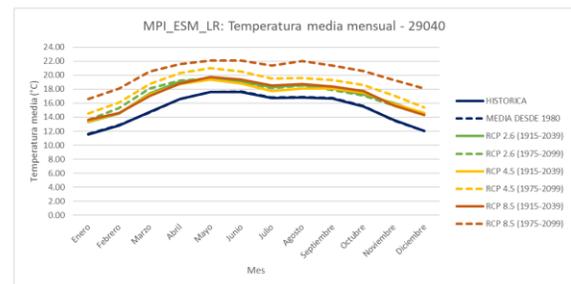
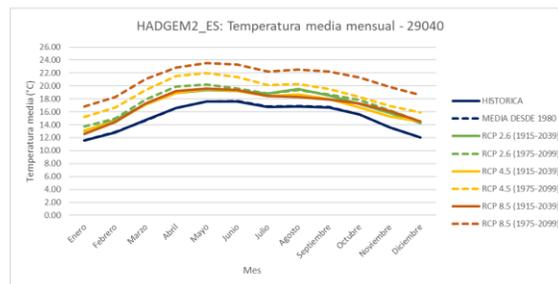
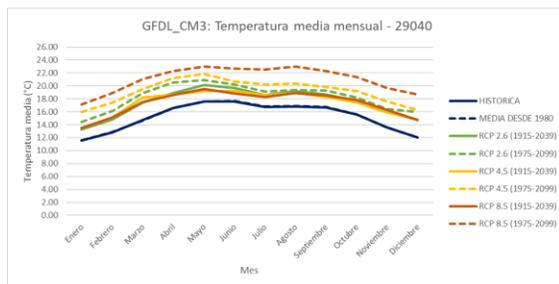
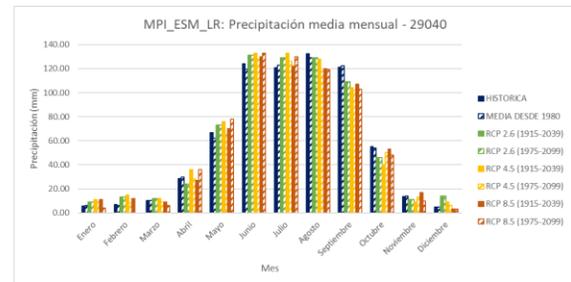
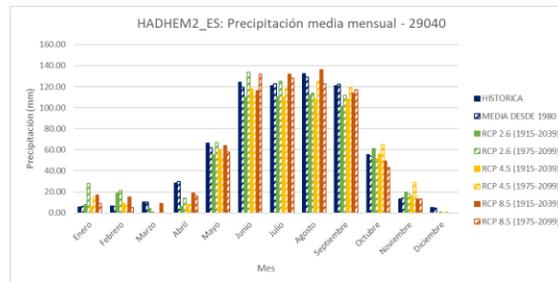
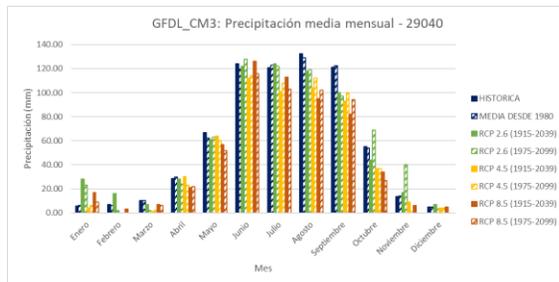
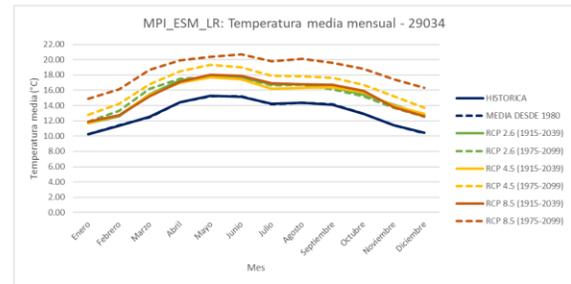
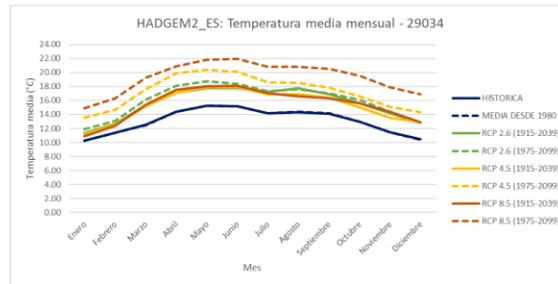
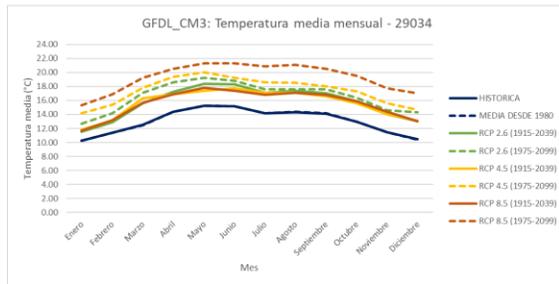
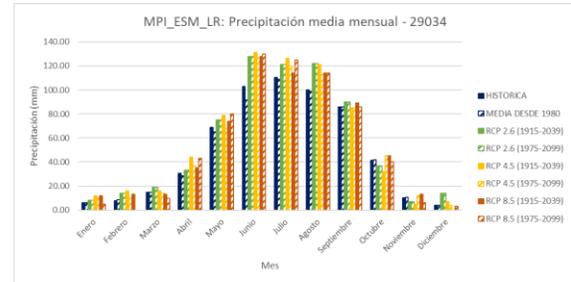
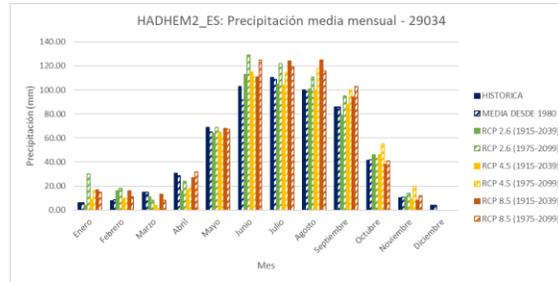
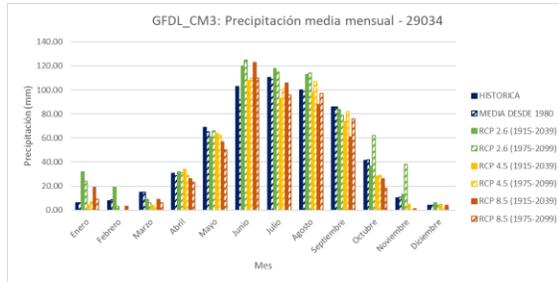


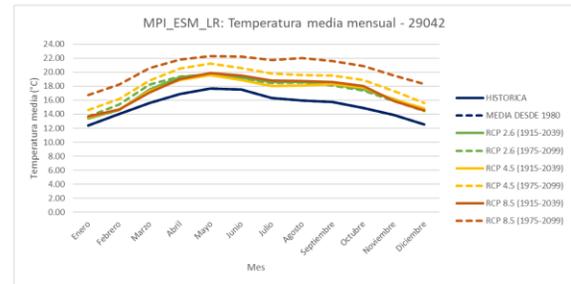
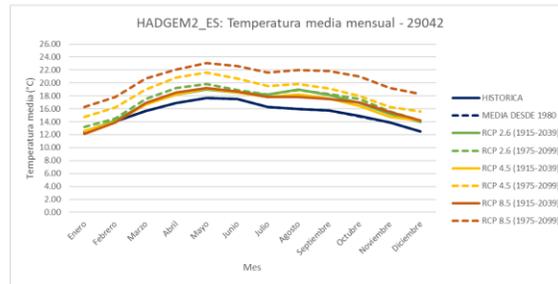
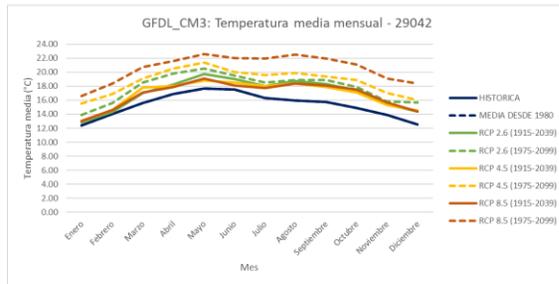
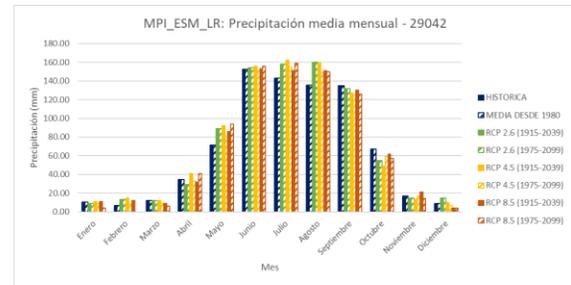
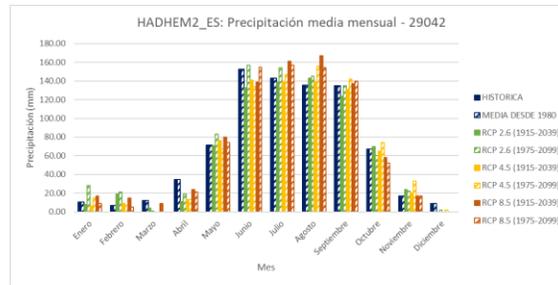
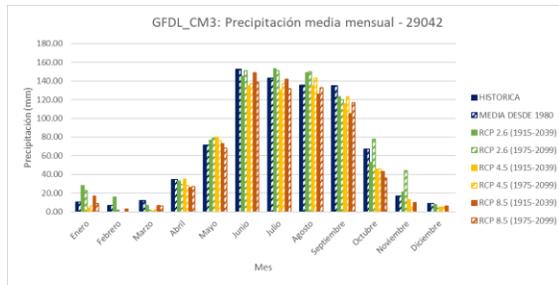
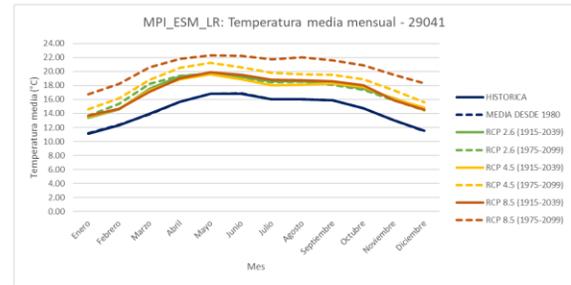
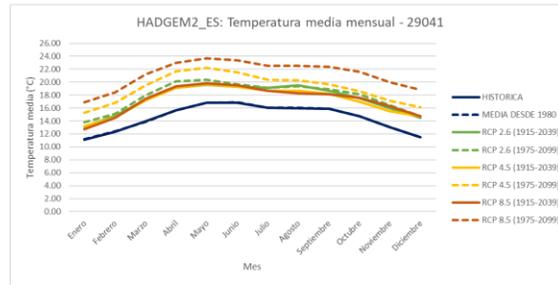
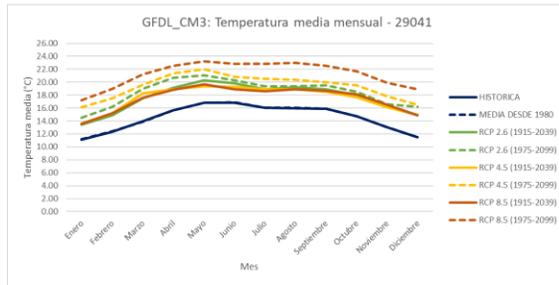
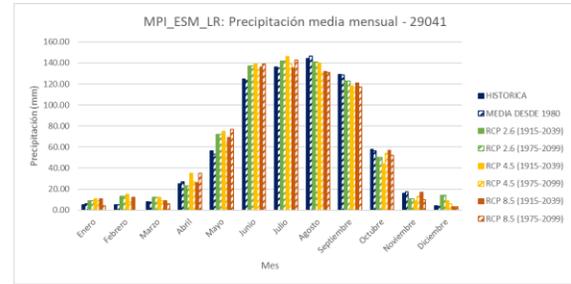
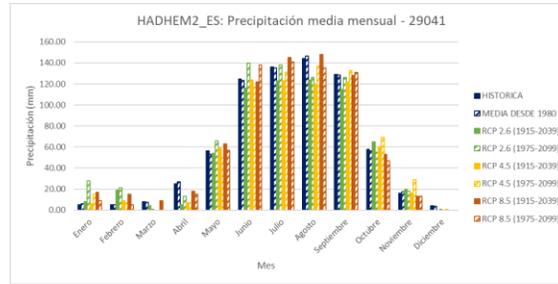
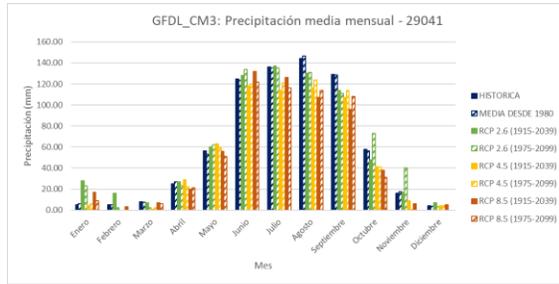


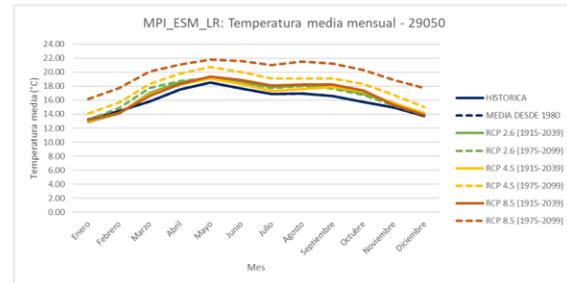
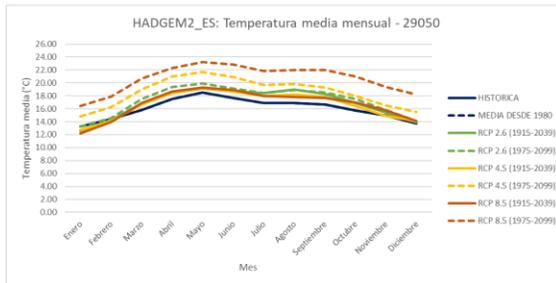
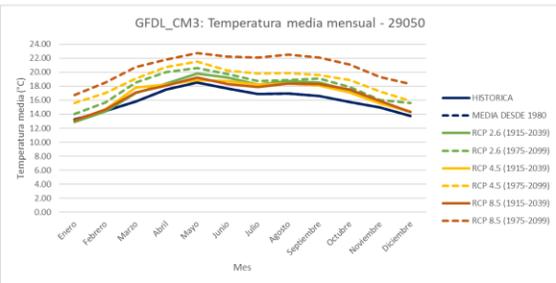
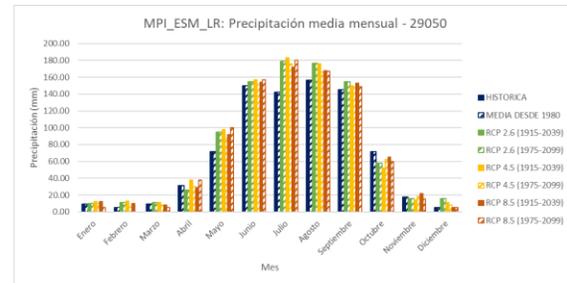
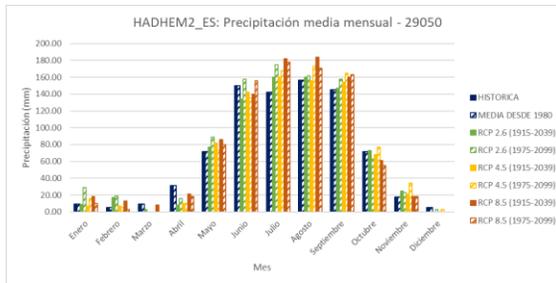
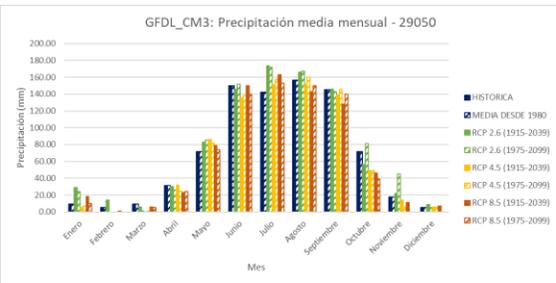
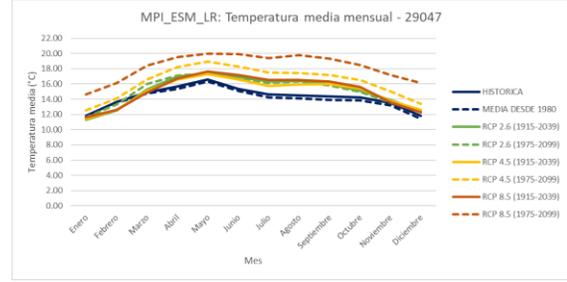
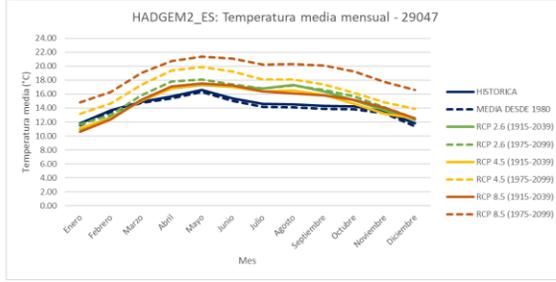
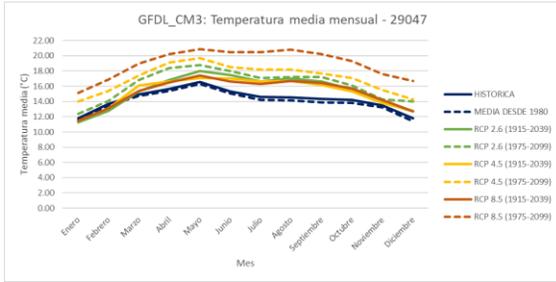
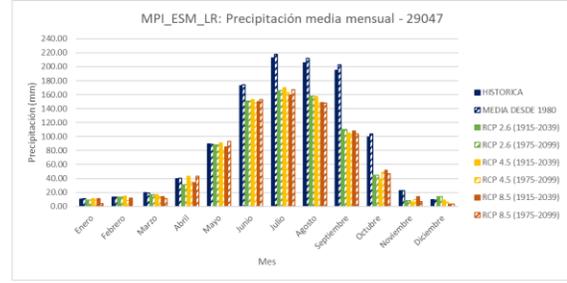
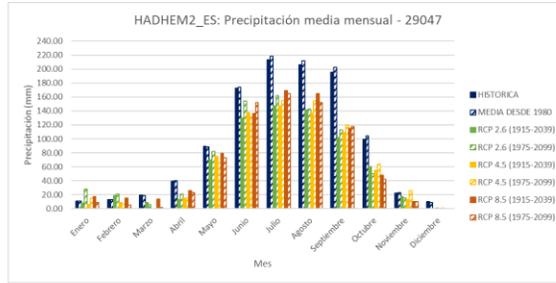
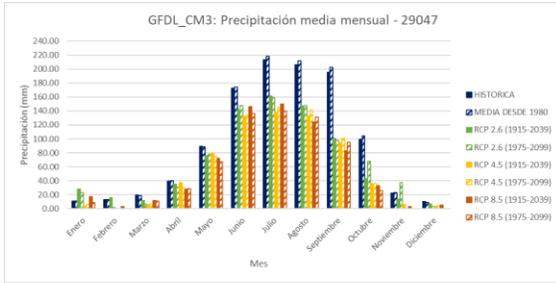


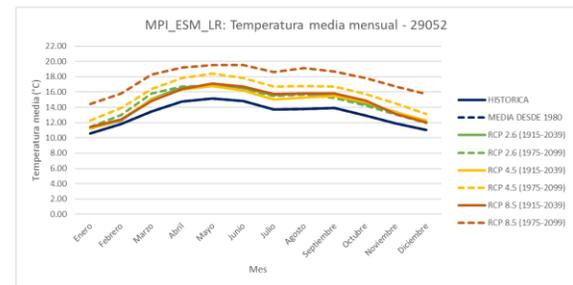
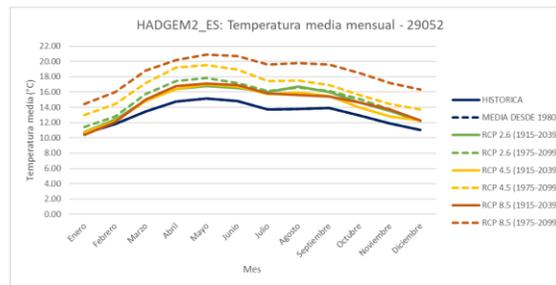
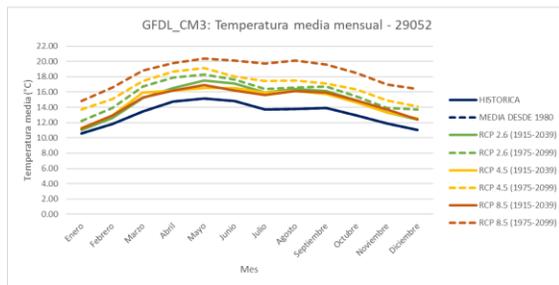
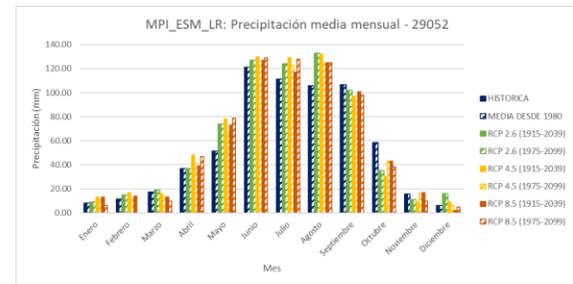
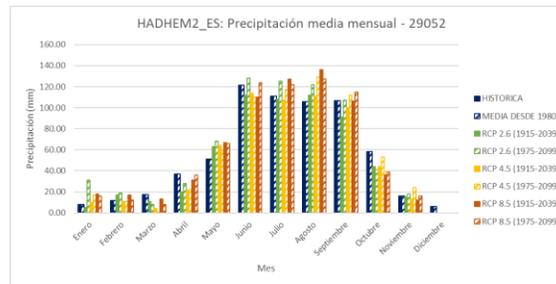
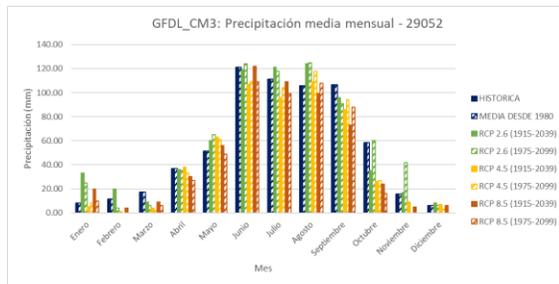
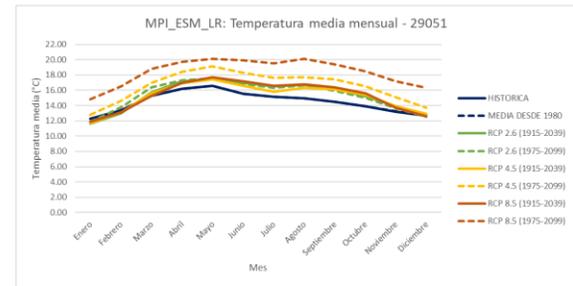
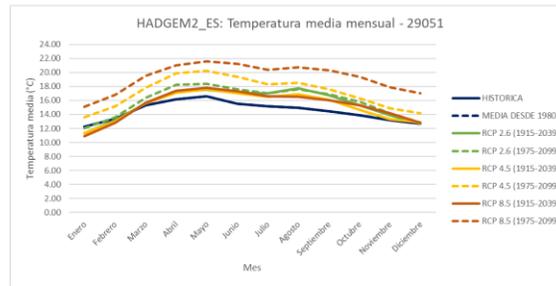
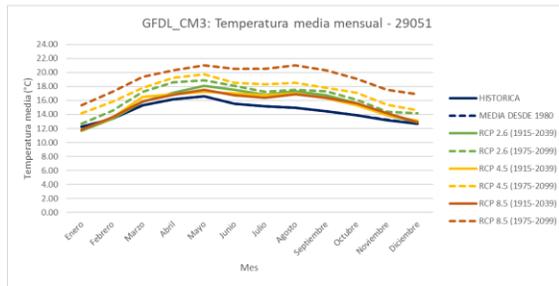
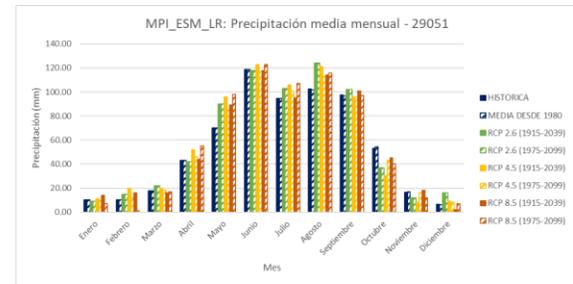
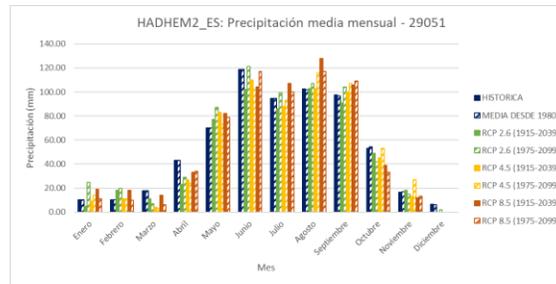
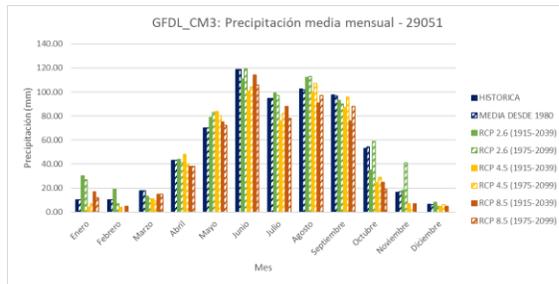


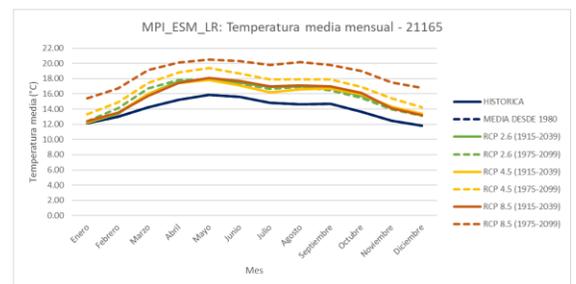
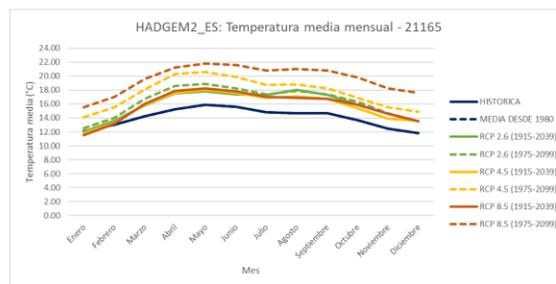
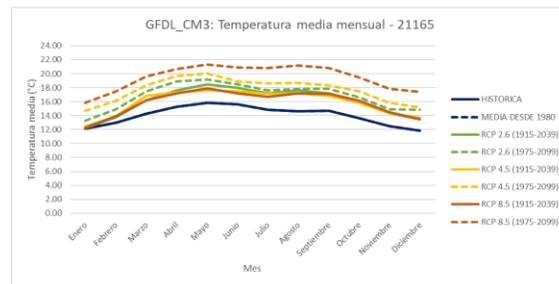
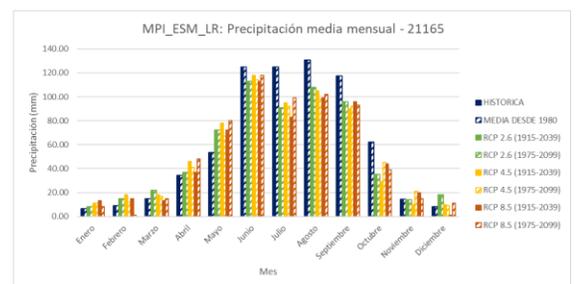
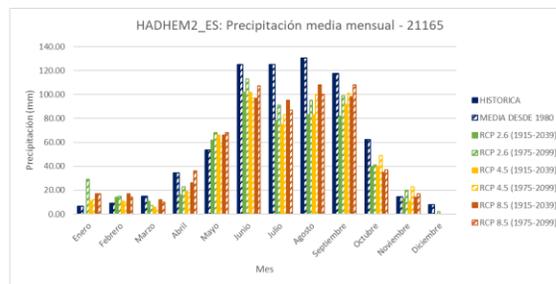
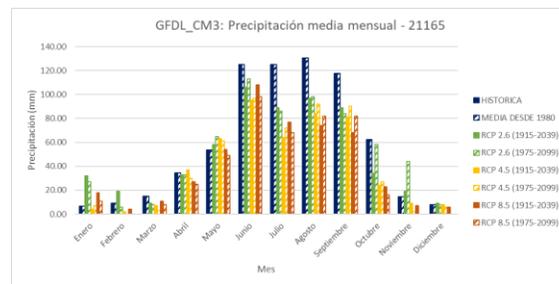
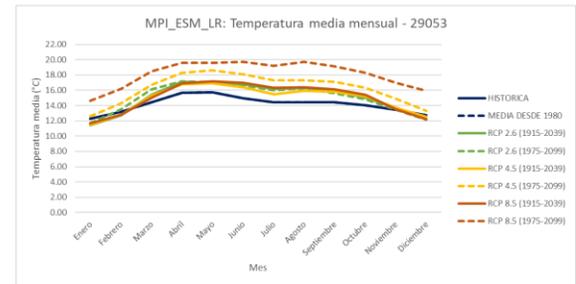
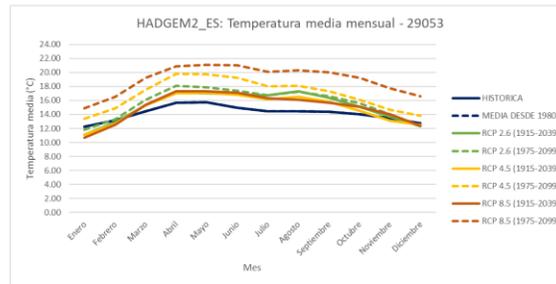
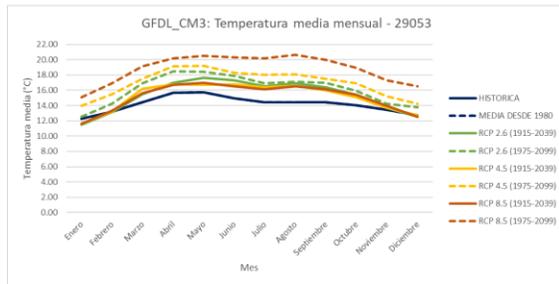
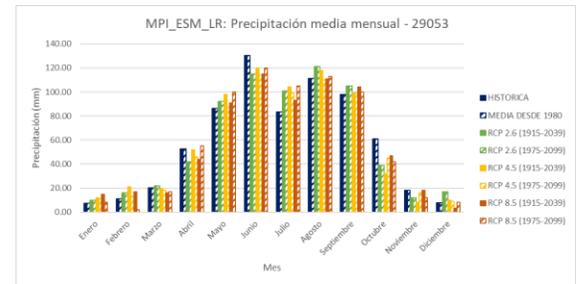
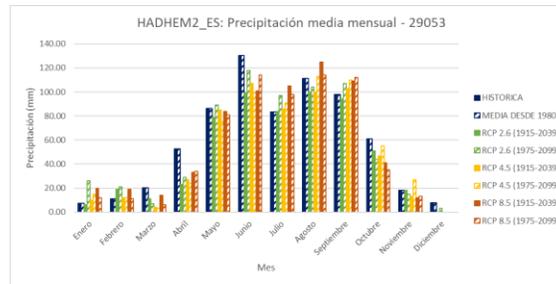
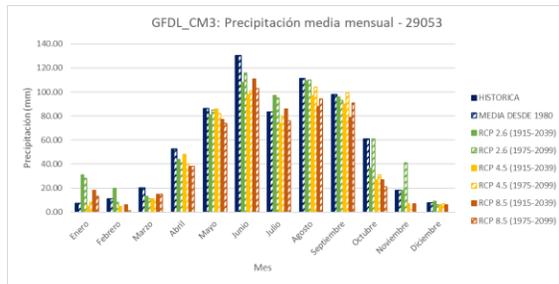








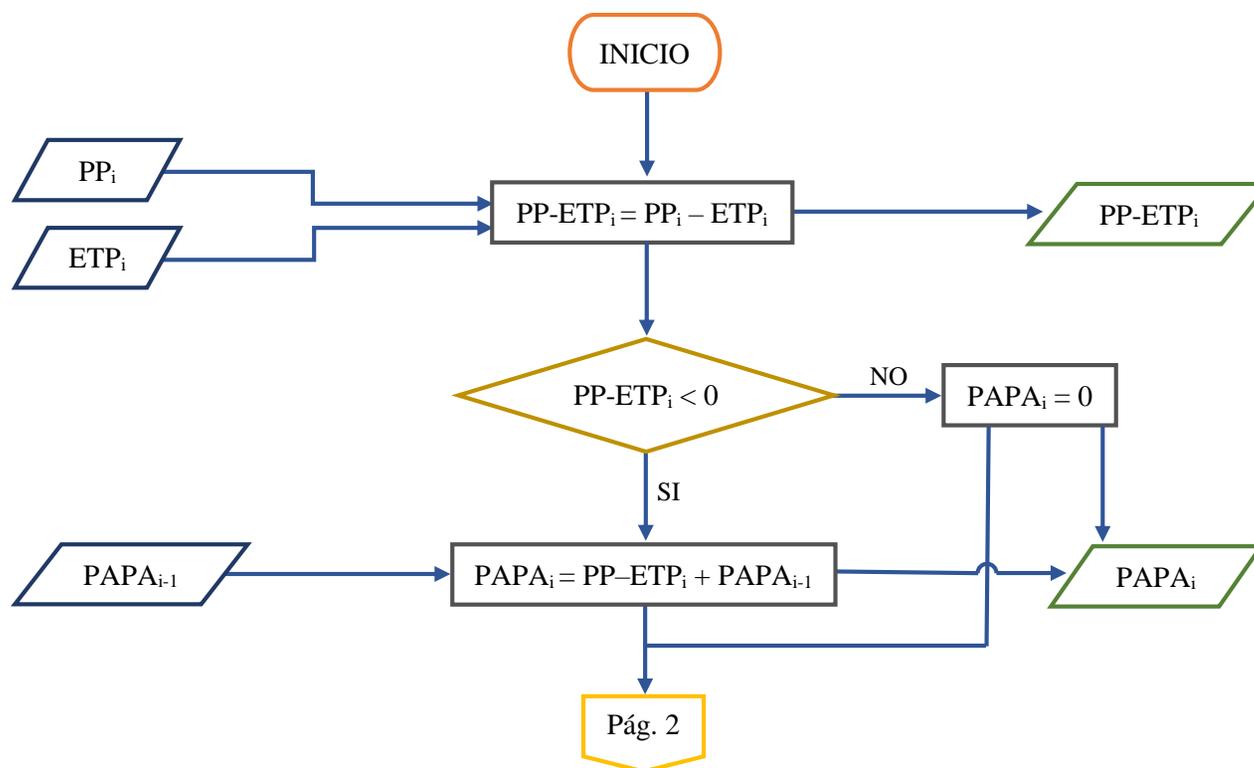


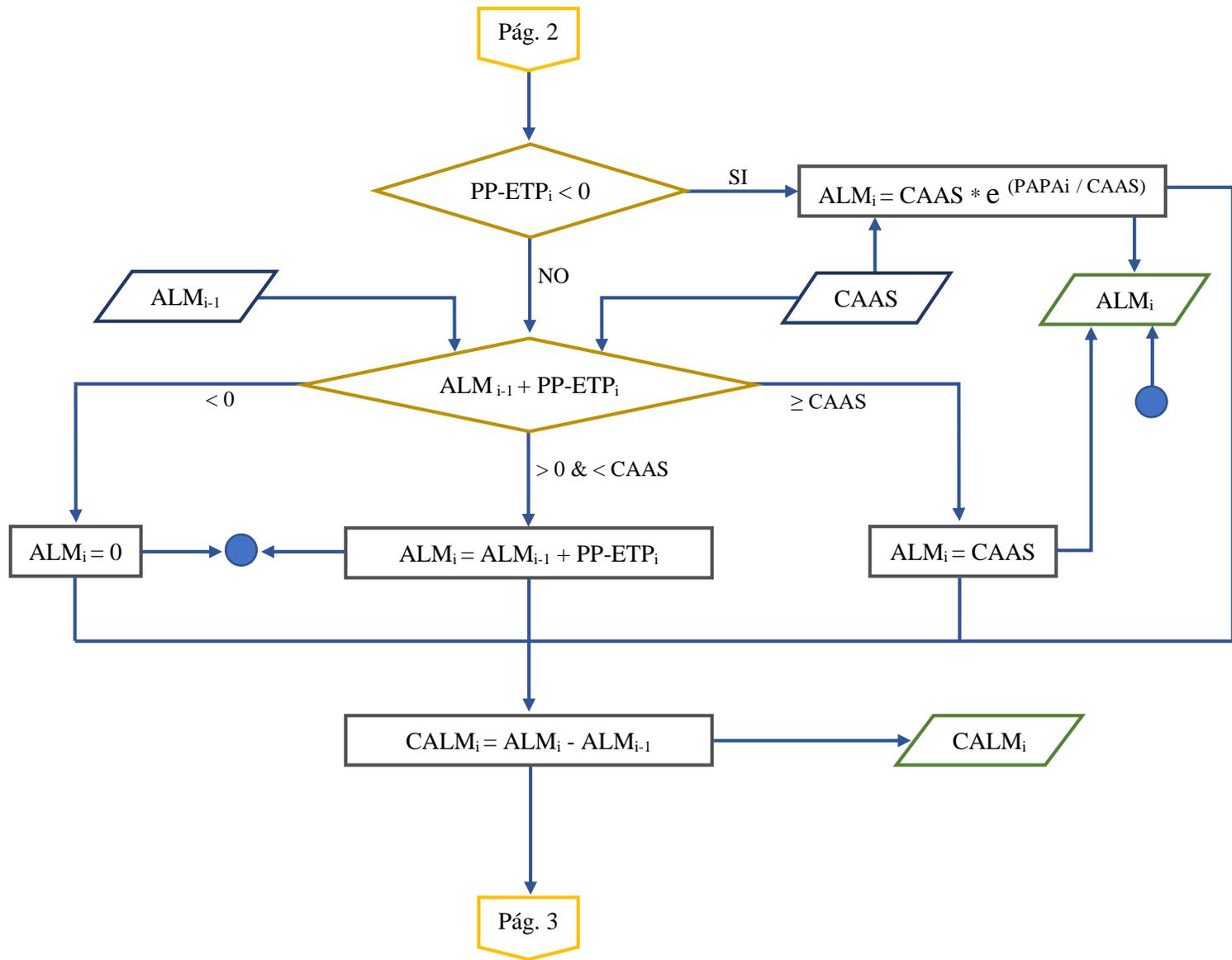


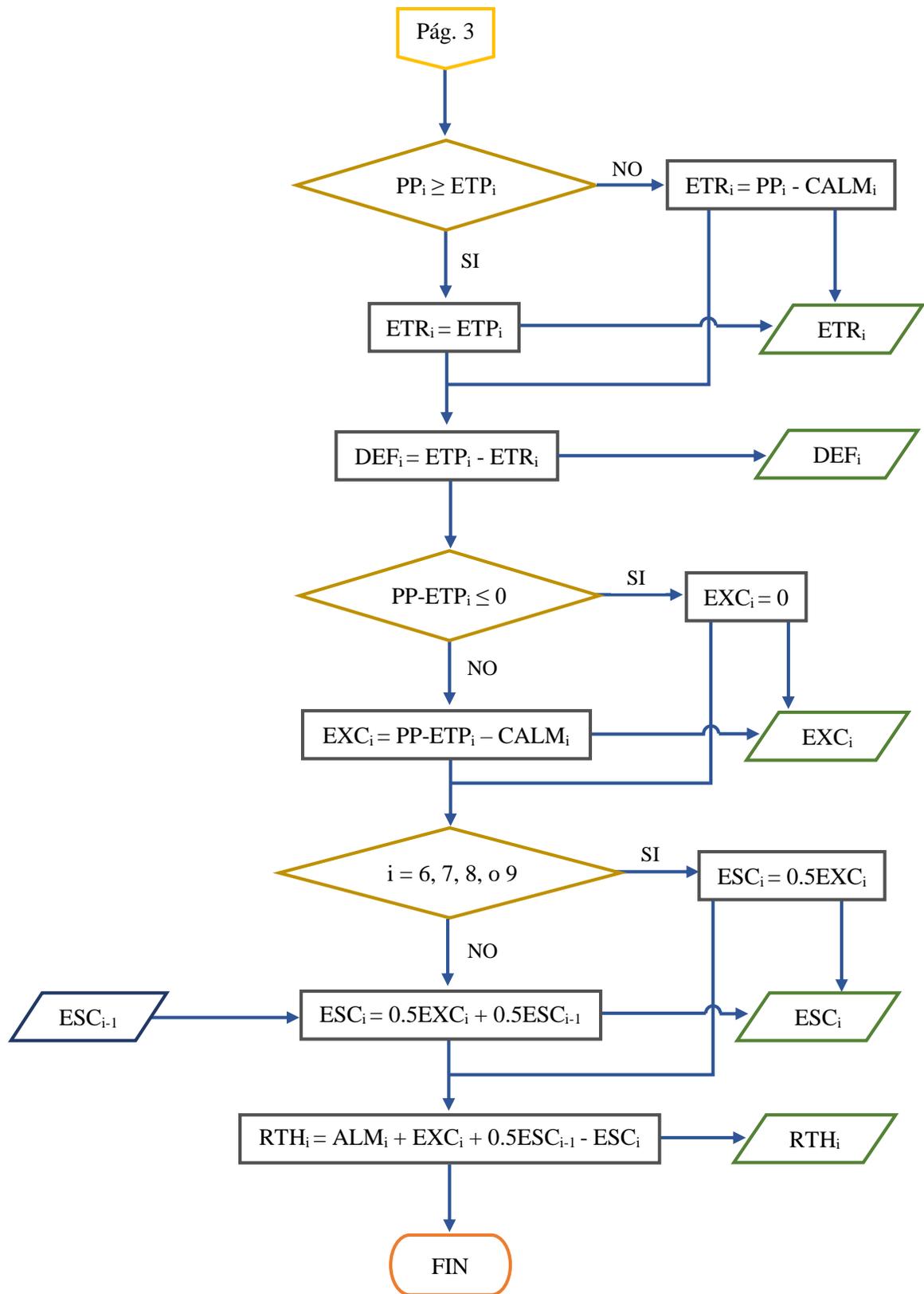
**ANEXO B: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DESARROLLADO PARA EL
CALCULO DEL BALANCE HÍDRICO**

Cálculo del Balance Hídrico Mensual
(Mes $i = 1, \dots, 12$)

Elaboró: Luis Enrique Hernández Salinas







**ANEXO C: MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ALTERACIONES PROMEDIO EN
VARIABLES HIDROLÓGICAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
PARA LA SUBCUENCA**

