



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO EN HIDROCIENCIAS

**DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO  
SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO  
TULANCINGO, EN EL ESTADO DE  
HIDALGO**

SANDRA LUZ TORRES SUÁREZ

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

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Diagnóstico hidrológico superficial de la cuenca del Río Tulancingo, en el estado de Hidalgo**, realizada por la estudiante: **Sandra Luz Torres Suárez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

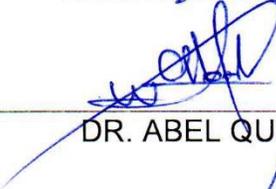
CONSEJERO

  
DR. MARTÍN ALEJANDRO BOLAÑOS GONZÁLEZ

CO-DIRECTORA

  
DRA. LAURA A. IBAÑEZ CASTILLO

ASESOR

  
DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR

  
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR

  
DR. AXEL EDUARDO RICO SÁNCHEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, noviembre de 2022

# DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO TULANCINGO, EN EL ESTADO DE HIDALGO

Sandra Luz Torres Suárez, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## RESUMEN

La cuenca del Río Tulancingo forma parte de la cuenca alta del río Metztitlán, en el estado de Hidalgo. Uno de los principales problemas relacionados con el agua en la cuenca, es el déficit de agua subterránea que ha motivado el decreto de zona de veda en el acuífero Valle de Tulancingo. El exceso de escurrimientos, que ha provocado inundaciones en la ciudad del mismo nombre, es otro de los problemas que afectan a la región. Los estudios realizados en materia de hidrología se han centrado en la cuenca del río Metztitlán, por lo que resulta necesaria la elaboración de un diagnóstico hidrológico que ayude a cuantificar espacial y temporalmente la disponibilidad de agua dentro de la cuenca del Río Tulancingo. El modelo SWAT se empleó en la determinación y cuantificación de los elementos del balance hidrológico superficial, se calibró ( $R^2 = 0.89$  y  $NS = 0.86$ ) y validó ( $R^2 = 0.77$  y  $NS = 0.62$ ) previamente con valores medios mensuales de la estación hidrométrica Venados, para los periodos 1982-2002 y 2003-2013, respectivamente. De las nueve subcuencas que conforman la cuenca del Río Tulancingo, las subcuencas altas: Río Chico (11), arroyo de Ventoquipa (12) y río San Lorenzo (13), manifestaron valores superiores en 2.2 veces las láminas de precipitación de las subcuencas bajas (5, 6, 7, 8, 9 y 10). El escurrimiento superficial y la infiltración reportaron valores máximos de julio a octubre y mínimos de abril a mayo. La disponibilidad máxima de agua final en el suelo se presentó en septiembre. En este mes las láminas medias se observaron en 139.6, 143.9 y 139.5 mm para las subcuencas 11, 12 y 13, respectivamente. La mínima de 1.1 mm y déficit de 1.0 mm se presentaron en las subcuencas 8 y 9, respectivamente. El Modelo Aditivo Generalizado brindó buen ajuste en la mayoría de las variables ( $0.6 < R^2 < 0.94$ ); y durante el último periodo de análisis (2006-2017) expuso valores superiores que en los periodos previos (1982-1993 y 1994-2005), con un nivel de significancia  $p < 0.001$ . Finalmente, se propusieron medidas a nivel de subcuenca, a fin conservar el recurso dentro de la cuenca.

**Palabras clave:** SWAT, balance hidrológico, Modelo Aditivo Generalizado, disponibilidad hídrica.

# **SURFACE HYDROLOGICAL DIAGNOSIS OF THE TULANCINGO RIVER BASIN, IN THE STATE OF HIDALGO**

**Sandra Luz Torres Suárez, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2022**

## **ABSTRACT**

The Río Tulancingo basin is part of the upper Metztitlán river basin in the state of Hidalgo. One of the main water-related problems in the basin is the groundwater deficit that has led to the decree of a closed zone in the Tulancingo Valley aquifer. Excessive runoff, which has caused flooding in the city of the same name, is another of the problems affecting the region. Hydrological studies have focused on the Metztitlán river basin, so it is necessary to develop a hydrological diagnosis to help quantify spatially and temporally the availability of water in the Río Tulancingo basin. The SWAT model was used in the determination and quantification of the elements of the surface hydrological balance, previously calibrated ( $R^2 = 0.89$  and  $NS = 0.86$ ) and validated ( $R^2 = 0.77$  and  $NS = 0.62$ ) with monthly average values from the Venados hydrometric station, for the periods 1982-2002 and 2003-2013, respectively. Of the nine sub-basins that make up the Tulancingo basin, the upper sub-basins: Río Chico (11), Ventoquipa stream (12) and San Lorenzo river (13), showed values 2.2 times higher than the precipitation depths of the lower sub-basins (5, 6, 7, 8, 9 and 10). Surface runoff and infiltration reported maximum values from July to October and minimum values from April to May. The maximum availability of final water in the soil occurred in September. In this month the mean depths were observed at 139.6, 143.9 and 139.5 mm in sub-basins 11, 12 and 13, respectively. The minimum of 1.1 mm and deficit of 1.0 mm occurred in sub-basins 8 and 9, respectively. The Generalized Additive Model provided a good fit in most variables ( $0.6 < R^2 < 0.94$ ); and during the last period of analysis (2006-2017) exhibited higher values than in previous periods (1982-1993 and 1994-2005),  $p < 0.001$ . Finally, actions were proposed at the sub-basin level to conserve the resource within the basin.

**Keywords:** SWAT, hydrologic balance, Generalized Additive Model, water availability.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por las pruebas acompañadas siempre de bendiciones en favor de mi progreso.

Al Programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, por la oportunidad de formarme en un posgrado de calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios.

Al Dr. Leonardo Tijerina Chávez<sup>†</sup> por su confianza y apoyo invaluable. Con profundo respeto y admiración.

A los miembros de mi Consejo Particular: Dr. Martín A. Bolaños González, Dra. Laura A. Ibáñez Castillo, Dr. Abel Quevedo Nolasco, Dr. Ramón Arteaga Ramírez, Dr. Axel E. Rico Sánchez por la asesoría, revisión, apoyo y paciencia. Mi reconocimiento y gratitud sincera.

Al Dr. Francisco Gavi Reyes<sup>†</sup>, Dr. Adolfo López Pérez y Dr. Humberto Vaquera Huerta, por la revisión, sugerencias y apoyo como sinodales en este trabajo de investigación.

A Sergio Iban, Yovana Lorely e Iván Enrique por el amor, acompañamiento e impulso de inicio a fin. A ustedes dedico este logro.

A mi madre, mi padre<sup>†</sup>, hermanas, familiares, amigos y todas aquellas personas que de manera directa o indirecta contribuyeron a la realización y culminación de esta meta.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	15
CAPÍTULO 2. CAPÍTULO II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	17
2.1. Objetivo General.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
2.3. Hipótesis .....	17
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES.....	19
CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO.....	22
4.1. Antecedentes de la modelación matemática .....	23
4.2. La ecuación de balance hídrico.....	26
4.3. <i>Software</i> disponible para la realización del balance hídrico .....	27
4.4. Datos de entrada al modelo SWAT .....	29
4.5. Resultados del Modelo SWAT .....	31
4.6. Aplicaciones de SWAT en estudios publicados .....	32
4.7. Calibración.....	40
4.8. Resumen.....	40
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
5.1 Localización de la zona de estudio .....	42
5.2 Elementos de entrada al modelo .....	43

5.2.1	Datos climáticos.....	43
5.2.2	Uso de suelo y vegetación.....	47
5.2.3	Tipo de suelo y sus características. ....	51
5.2.4	Delimitación de la cuenca.....	53
5.2.5	Elementos que constituyen la demanda de agua.....	54
5.2.6	Profundidad del nivel freático.....	59
5.2.7	Métodos de cálculo seleccionados en el modelo .....	61
5.3	Balance Hidrológico .....	61
5.3.1	Primer Balance, SW1.....	62
5.3.2	Segundo Balance, SW2.....	63
5.3.3	Análisis de 3 subperiodos de tiempo.....	64
5.4	Calibración y validación .....	64
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		66
6.1	Calibración y validación .....	66
6.2	Cuenca Venados.....	72
6.2.1	Precipitación.....	72
6.2.2	Evapotranspiración potencial (PET) y evapotranspiración actual (ET).....	73
6.2.3	Caudal medio mensual en corrientes por subcuenca .....	75
6.3	Cuenca del Río Tulancingo.....	78
6.3.1	Elementos del balance por subcuenca.....	79
6.3.2	Balance medio mensual por subcuenca, SW1. ....	91
6.3.3	Balance medio mensual por subcuenca, SW2. ....	95
6.3.4	Análisis por periodo: Elementos del balance. ....	99

6.3.5 Análisis por periodo: Disponibilidad de agua final en el suelo (SW1).....	105
CAPÍTULO 7. MEDIDAS PROPUESTAS PARA LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO EN LA CUENCA TULANCINGO.....	107
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES .....	110
CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES .....	112
CAPÍTULO 10. LITERATURA CITADA.....	113
ANEXOS .....	120
Anexo 1.Caudales de entrada y salida por subcuenca.....	120
Anexo 2. Disponibilidad mensual por subcuenca, SW1.....	129

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1. Estudios previos realizados en la zona de estudio, que han sido publicados.....</b>	<b>20</b>
<b>Cuadro 2. Algunos modelos lluvia-escorrentamiento vigentes (generado a partir del elaborado por Vargas <i>et al.</i>, 2015).....</b>	<b>28</b>
<b>Cuadro 3. Métodos hidrológicos de cálculo del modelo SWAT.....</b>	<b>30</b>
<b>Cuadro 4. Pronósticos para la calidad y cantidad del agua bajo diferentes escenarios globales y locales aplicados a corto, mediano y largo plazo en la literatura revisada por pares, usando la herramienta SWAT (Marín <i>et. al.</i>, 2020).....</b>	<b>34</b>
<b>Cuadro 5. Cambios de uso de suelo y vegetación (USV), indicados en el modelo SWAT para los periodos de la simulación: 1980-2001 y 2002-2017.....</b>	<b>51</b>
<b>Cuadro 6. Valores de conductividad hidráulica (K) asignados a la corriente principal de cada subcuenca.....</b>	<b>53</b>
<b>Cuadro 7. Distribución mensual, en porcentaje, considerada para las extracciones de los usos: agrícola y pecuario.....</b>	<b>57</b>
<b>Cuadro 8. Volúmenes de remoción diaria promedio, de agua superficial por subcuenca (WURCH), m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>.....</b>	<b>58</b>
<b>Cuadro 9. Volúmenes de remoción diaria promedio de agua subterránea (WUSHAL), m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>.....</b>	<b>59</b>
<b>Cuadro 10. Descripción de las variables de salida obtenidas en el modelo SWAT. ....</b>	<b>62</b>
<b>Cuadro 11. Descripción, método de cambio, intervalos de ajuste inicial y valores ajustados para los parámetros seleccionados. ....</b>	<b>67</b>
<b>Cuadro 12. Análisis de sensibilidad de los parámetros seleccionados.....</b>	<b>68</b>

<b>Cuadro 13.</b>	<b>Caudal medio mensual de entrada (<math>m^3s^{-1}</math>), obtenido para cada subcuenca en SWAT.....</b>	<b>76</b>
<b>Cuadro 14.</b>	<b>Caudal medio mensual de salida obtenido para cada subcuenca en SWAT.....</b>	<b>77</b>
<b>Cuadro 15.</b>	<b>Valores medios mensuales por subcuenca (mm).....</b>	<b>81</b>
<b>Cuadro 16.</b>	<b>Disponibilidad de agua final en el suelo, valor medio mensual por subcuenca (mm), SW1.....</b>	<b>92</b>
<b>Cuadro 17.</b>	<b>Resultados del escenario de disponibilidad de agua final en el suelo No. 1 (SW2), valor medio mensual por subcuenca, en mm.....</b>	<b>95</b>
<b>Cuadro 18.</b>	<b>Coefficientes de Determinación (<math>R^2</math>), obtenidos de la aplicación del modelo GAM, para cada variable por subcuenca.....</b>	<b>101</b>
<b>Cuadro 19.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 5, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>120</b>
<b>Cuadro 20.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 6, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>121</b>
<b>Cuadro 21.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 7, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>122</b>
<b>Cuadro 22.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 8, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>123</b>
<b>Cuadro 23.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 9, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>124</b>
<b>Cuadro 24.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 10, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>125</b>
<b>Cuadro 25.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 11, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>126</b>
<b>Cuadro 26.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 12, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>127</b>
<b>Cuadro 27.</b>	<b>Caudal de entrada y salida de la subcuenca 13, en <math>m^3s^{-1}</math>.....</b>	<b>128</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Cronología de la modelación matemática (elaboración propia a partir de Singh y Woolhiser, 2002).</b> .....	<b>25</b>
<b>Figura 2. Esquema del Balance y resultados de salida en SWAT.</b> .....	<b>31</b>
<b>Figura 3. Publicaciones de extremos hidro-climáticos con SWAT, con base en publicaciones anuales (a), tamaño de cuenca (b) y países (c), (Tan <i>et al.</i>, 2020).</b> .....	<b>32</b>
<b>Figura 4. Variables de salida más comunes en SWAT, utilizadas para la interpretación de Servicios Ecosistémicos.</b> .....	<b>39</b>
<b>Figura 5. Ubicación de la zona de estudio.</b> .....	<b>43</b>
<b>Figura 6. Estaciones climatológicas dentro de la cuenca del Río Metztlán.</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 7. Comparativa de los periodos de tiempo con información disponible por estación.</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 8. Polígonos de Thiessen de las estaciones seleccionadas.</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 9. Superficie por tipo de vegetación en la cuenca, Series INEGI.</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 10. Tipo de vegetación, cobertura vegetal y asentamientos humanos que presenta los mayores cambios.</b> .....	<b>49</b>
<b>Figura 11. Distribución espacial de uso de suelo y vegetación en la zona de estudio, USV serie II del INEGI.</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 12. Sitios de muestreo para la determinación de características por tipo de suelo, predominantes en la zona de estudio.</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 13. Distribución espacial de los tipos de suelo dentro de la cuenca.</b> .....	<b>52</b>

<b>Figura 14. Sitios de pruebas de infiltración realizadas sobre taludes de los cauces principales.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 15. Mosaico de imágenes (10), descargadas para la delimitación de la cuenca.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 16. Distribución geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas registradas en el REPDA dentro de la cuenca.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 17. Distribución por uso del agua en la cuenca (REPDA, 2018).....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 18. Límites geográficos de acuíferos dominantes en la zona de estudio.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 19. Curvas de igual profundidad del nivel estático identificadas por subcuenca. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 20. Comparación de valores de escurrimiento medio mensual, medidos y estimados para el periodo de calibración (1982-2002).....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 21. Hidrograma del periodo de calibración 1982-2002, caudales mensuales observados y estimados con SWAT.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 22. Correlación entre valores de caudal observado en la estación hidrométrica Venados vs caudal estimado en el modelo SWAT, periodo de calibración 1982-2002. ....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 23. Hidrograma del periodo de validación (2003-2013), caudales mensuales observados y estimados con SWAT.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 24. Correlación entre valores de caudal observado en la estación hidrométrica Venados vs valores de caudal estimado en el modelo SWAT, periodo de validación 2003-2013.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 25. Distribución de la precipitación media mensual en la Cuenca Venados. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 26. Distribución de la evapotranspiración potencial en la Cuenca Venados.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 27. Distribución de la evapotranspiración actual (ET) por subcuenca.....</b>	<b>75</b>

<b>Figura 28. Hidrogramas de entrada y salida por subcuenca.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 29. Distribución de las subcuencas que conforman la cuenca del río Tulancingo.</b>	
.....	<b>79</b>
<b>Figura 30. Distribución media mensual de Precipitación (SW) en la cuenca Tulancingo,</b>	
<b>en mm. ....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 31. Distribución media mensual de Precipitación (PREC) en la cuenca</b>	
<b>Tulancingo, en mm. ....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 32. Distribución media mensual de la evapotranspiración (ET) en la cuenca</b>	
<b>Tulancingo, en mm. ....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 33. Distribución media mensual del escurrimiento superficial (SURQ) en la</b>	
<b>cuenca Tulancingo, en mm. ....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 34. Agua percolada más allá del perfil del suelo (PERC) en la cuenca</b>	
<b>Tulancingo, en mm. ....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 35. Contribución del agua subterránea (GW) en la cuenca Tulancingo, en mm. ....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 36. Disponibilidad de agua final en el suelo, valor medio mensual por subcuenca</b>	
<b>(mm), SW1. ....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 37. Escenario de disponibilidad final de agua en el suelo No. 2, valor medio</b>	
<b>mensual por subcuenca (mm), SW2. ....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 38. Disponibilidad final de agua en el suelo No. 1 (SW1) y escenario de</b>	
<b>disponibilidad final de agua en el suelo No 2 (SW2), valores medios</b>	
<b>mensuales por subcuenca, en mm. ....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 39. Precipitación media anual en los periodos: 1982-1993, 1994-2005 y 2006-</b>	
<b>2017 de las cuencas: Venados (izquierda) y Tulancingo (derecha). ....</b>	<b>99</b>

<b>Figura 40. Caudal de salida, valor medio anual en los periodos: 1982-1993, 1994-2005 y 2006-2017 de las cuencas: Venados (izquierda) y Tulancingo (derecha).....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 41. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para valores medios mensuales de precipitación por subcuenca, en mm. ....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 42. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para valores medios mensuales de caudal de salida por subcuenca, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. ....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 43. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para: Disponibilidad media mensual de agua final en el suelo por subcuenca (SW1), en mm; caudales de escurrimiento medio mensual medidos en la estación hidrométrica Venados y los estimados con SWAT hacia la cuenca de salida (subcuenca 1), en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. El área gris indica un intervalo de confianza del 95%. ....</b>	<b>106</b>

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Tulancingo, se tiene registro de afectaciones debido a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos que provocan encharcamientos e inundaciones. Estos fenómenos ocurren al interactuar ondas del este (canal de baja presión que se desplaza en dirección oeste) con flujo de aire que va de oeste a este, así como a ciclones tropicales del Golfo de México, principalmente en los meses de agosto, septiembre y octubre (Herrera *et al.*, 2018). La falta de regulación de la presa “La Esperanza” (localizada aguas arriba sobre el Río Chico), constituye otro inconveniente en la región, ya que se encuentra al límite de su vida útil (Bonasia *et al.*, 2017).

En contraste con los problemas asociados a las inundaciones en la cuenca, el acuífero “Valle de Tulancingo (1317)” presenta un 87% de su superficie sujeta al “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo del mismo” (DOF, 2020). Lo anterior debido a que, en su balance hidrológico subterráneo, el déficit se ha incrementado año tras año. A nivel de cuenca, los estudios realizados y publicados en la región se han enfocado particularmente en la calidad del agua, análisis de patrones de precipitación y afectaciones debido al escurrimiento, todos ellos de manera independiente. En ese sentido, se considera que la integración de los elementos que constituyen el balance a nivel de cuenca, analizados geoespacialmente, podría ayudar a la identificación del problema de origen y, en consecuencia, a la propuesta de acciones específicas que ayuden a la conservación del recurso hídrico dentro de la cuenca.

El modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se ha utilizado y probado ampliamente, en distintas áreas, para la realización de balances hidrológicos (Shawul *et al.*, 2019) mostrando resultados y calibración favorables (Marín *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Así, el objetivo de la presente investigación fue la realización del diagnóstico hidrológico superficial que,

mediante el uso de la herramienta SWAT, permita analizar y cuantificar geoespacial y temporalmente los elementos que intervienen en el balance hidrológico de la cuenca del Río Tulancingo, para identificar tanto las zonas con disponibilidad como las deficitarias, y realizar propuestas de conservación del recurso hídrico a nivel de cuenca.

## **CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1.Objetivo General**

Diagnosticar el estado hidrográfico de la cuenca del Valle de Tulancingo, en el estado de Hidalgo, mediante la cuantificación geoespacial y temporal de la cantidad de agua deficitaria y excedente.

### **2.2.Objetivos Específicos**

- Cuantificar el valor de los elementos que integran la ecuación de balance en la fase terrestre del ciclo hidrológico mediante un modelo de simulación y analizar su comportamiento de forma individual.
- Determinar y analizar la disponibilidad media mensual a nivel de subcuenca, e identificar las regiones y periodos con disponibilidad o déficit.
- Analizar de manera agrupada, en subperiodos de 12 años, el comportamiento del caudal de escurrimiento en las corrientes principales de la cuenca de estudio, así como la disponibilidad por subcuenca, para el periodo de información disponible.
- Con base en los resultados obtenidos, realizar recomendaciones en favor de una mejora en la disponibilidad y distribución del recurso hídrico dentro de la cuenca de estudio.

### **2.3.Hipótesis**

- El uso de un modelo de simulación hidrológico semi-distribuido, como lo es el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), es pertinente para el cálculo del valor de los elementos del balance hídrico en la fase terrestre del ciclo hidrológico, al ser calibrado con información del escurrimiento histórico.

- El balance hidrológico, temporal y espacialmente explícito, permitirá definir zonas y temporadas de disponibilidad hídrica, así como aquellas donde se presenta un déficit.
- El análisis de los resultados del balance hidrológico superficial, agrupado en subperiodos de tiempo, facilita la identificación de cambios temporales en la tendencia de sus componentes a nivel de subcuenca, particularmente el caudal que escurre por las corrientes principales y el agua disponible en el suelo.
- Los resultados obtenidos del balance hidrológico permitirán proponer recomendaciones *ad hoc* para mejorar la disponibilidad y distribución del recurso agua dentro de la cuenca de estudio.

### **CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES**

En la zona de estudio se han realizado y publicado algunos trabajos (Cuadro 1), a nivel de la cuenca del río Metztlán, de la cual forma parte la subcuenca del Río Tulancingo.

En el Cuadro 1, se observan dos estudios realizados de manera independiente a nivel de cuenca del río Metztlán, en el que el cambio de uso de suelo detectado por Valdéz *et al.* (2011), podría haber modificado el escurrimiento; y que Mendoza *et. al.* (2015) identificaron y asociaron en su estudio con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. Por lo tanto, es posible que la cuenca del Río Tulancingo (subcuenca del Metztlán), pueda presentar un efecto similar; aunque el enfoque de los estudios realizados se centra en la calidad del agua y los problemas de inundaciones

**Cuadro 1. Estudios previos realizados en la zona de estudio, que han sido publicados.**

TITULO	OBSERVACIONES	AUTOR
Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán (México) usando imágenes de satélite:1985-2007.	Se encontraron dos procesos evidentes: deforestación (0.5 % anual), donde las coberturas más activas fueron el matorral y el bosque de coníferas y latifoliadas con un cambio a agricultura de temporal; y un crecimiento de la mancha urbana de 4.3 % anual (250.8% en 22 años).	Valdéz <i>et al.</i> , 2011.
Modelo de asignación de agua considerando un caudal ambiental mínimo en la cuenca del río Metztitlán en Hidalgo, México	Usos público-urbano y pecuario cubren totalmente sus requerimientos; agrícola, ambiental, industrial y múltiple presentaron déficits mensuales y anuales. Déficit ocurre en la parte baja de la cuenca; 31-33% (sequia ligera), 62 a 66% (sequía severa). Tendencia a la baja de los escurrimientos en periodo seco y tendencia a incrementar en el periodo húmedo. No detectaron señales que vincularan los cambios con el cambio climático, pero si con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. Cotas de inundación entre 1246 y 1258. ( <i>software Regime Shift Detection</i> ).	Ortíz <i>et al.</i> , 2015.
Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztitlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático.		Mendoza <i>et. al.</i> , 2018.

TITULO	OBSERVACIONES	AUTOR
Evaluación de la Relación de Adsorción de Sodio en las Aguas del Río Tulancingo, en el Estado de Hidalgo, México.	Las aguas se clasifican dentro de la familia cálcico/magnésico-bicarbonatadas. Pueden tener efecto en los procesos de infiltración, dado que algunas fracciones de los iones de calcio se precipitan en forma de carbonato de calcio.	Can <i>et al.</i> , 2008.
Calidad Biológica de Aguas Residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México.	Se evaluaron coliformes fecales (en aguas residuales, suelo y plantas) y helmintos (en aguas residuales) en el módulo II del Distrito de Riego 028, Tulancingo, Hidalgo. Encontraron contaminación alta debido a coliformes fecales (en agua, suelo y plantas), así como huevos de helmintos en las aguas residuales, empleadas para riego de cultivos en el distrito. Los valores que obtuvieron rebasaron los límites permisibles de las normas oficiales mexicanas.	Hernández <i>et al.</i> , 2014.
Flooding Hazard assessment at Tulancingo (Hidalgo, México)	Modelación hidráulica bidimensional (IBER), para la obtención de mapas de riesgo de inundación en la ciudad de Tulancingo.	Bonasia <i>et al.</i> , 2017.
Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo.	Los fenómenos meteorológicos relacionados a eventos extremos fueron: la interacción de ondas del este con flujo del oeste, así como ciclones tropicales provenientes del Golfo de México. Los patrones espaciales de precipitación coincidieron en lluvia acumulada al norte, noreste y este de la ciudad.	Herrera <i>et al.</i> , 2018.

## CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO

Los modelos hidrológicos permiten comprender la respuesta hidrológica de la cuenca, para mejorar la gestión de los recursos hídricos y los programas de desarrollo a nivel de microcuencas o cuencas (Takele *et al.*, 2022). Además, la modelación del balance hídrico a nivel de cuenca posibilita el diagnóstico, planteamiento de medidas preventivas y correctivas a problemas de escasez que derivan en déficit. En la actualidad, existe una gran variedad de *software*, que se encuentra disponible de manera gratuita, para ser probado y aplicado, si se cuenta con el conocimiento y la información adecuada. El modelo SWAT es considerado un Sistema de Modelación de Precipitación-Escorrentamiento (PRMS, por sus siglas en inglés), de parámetros distribuidos y con base en procesos físicos que se emplea, entre otros fines, para evaluar la respuesta de diferentes combinaciones de clima y uso de la tierra en el flujo de corrientes naturales y la hidrología general de las cuencas.

Los cambios en el clima, el uso del suelo y su cobertura inciden en los componentes del balance hídrico al alterar los procesos hidrológicos (Chanapathi y Thatikonda, 2019). La modelación de la hidrología en cuencas ha sido de gran ayuda para entender y proyectar condiciones pasadas, presentes y futuras de la evolución en el manejo y distribución del agua. Para ello existe una gran cantidad de *software* para realizar un de balance hídrico; sin embargo, no todo es de uso libre; aquellos que sí lo son, tienen la ventaja de ser probados y utilizados con fines de investigación de manera frecuente. En ese sentido, los más usados en México para modelar el proceso lluvia-escorrentamiento, son el SWAT y el Hydrologic Modeling System (HEC-HMS); el primero realiza el análisis a escala de tiempo diaria para periodos de tiempo largos (años). El segundo está enfocado principalmente eventos meteorológicos extremos (Vargas *et al.*, 2015). Otro más, con fines de planificación integrada a nivel de cuenca, es el Water Evaluation and Planning System (WEAP),

que posee una interfaz gráfica con base en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y funciona usando el principio básico del balance hídrico; que se puede aplicar en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas de cuencas transfronterizas (WEAP, 2020).

De esa forma, en estudios formales, apoyados en *software* especializado y probado a nivel internacional para diagnosticar el estado que guardan los recursos hídricos a nivel de cuenca, brindan información valiosa, que puede servir de apoyo a los agentes involucrados en la toma de decisiones. A continuación, se presenta una revisión del panorama general de la historia y disponibilidad de modelos hidrológicos, con enfoque especial en la herramienta SWAT, la cual ha sido ampliamente probada para diversos fines; con hallazgos documentados y publicados en revistas de divulgación científica de alto factor de impacto.

#### **4.1. Antecedentes de la modelación matemática**

Mesa y Villa (2011) afirman que suele confundirse que un modelo es una réplica de la realidad, como las matemáticas, que son resultado de la actividad científica del hombre ante objetos que ha creado; sin embargo, explican que un modelo corresponde a la idealización de esa realidad. No todo modelo es bueno por sí mismo, haciendo referencia a Badiou (1972), éste define al mejor modelo como aquel que, sin dejar de ser sencillo, utiliza únicamente los hechos considerados e informa acerca de todos. Lo anterior no resulta sencillo, ya que el modelo utilizado debe ser veraz y ligado a los hechos de los que debe dar cuenta y a la forma en que lo hará.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012) clasifica los modelos hidrológicos en físicos, analógicos y matemáticos. Dentro de los modelos matemáticos (los más utilizados), se encuentran los empíricos o de caja negra, los conceptuales y los teóricos o de caja blanca. La

clasificación anterior puede derivar en modelo lineal o no lineal y agrupados o distribuidos para, finalmente, calificarse como determinísticos o estocásticos (Xu, 2002).

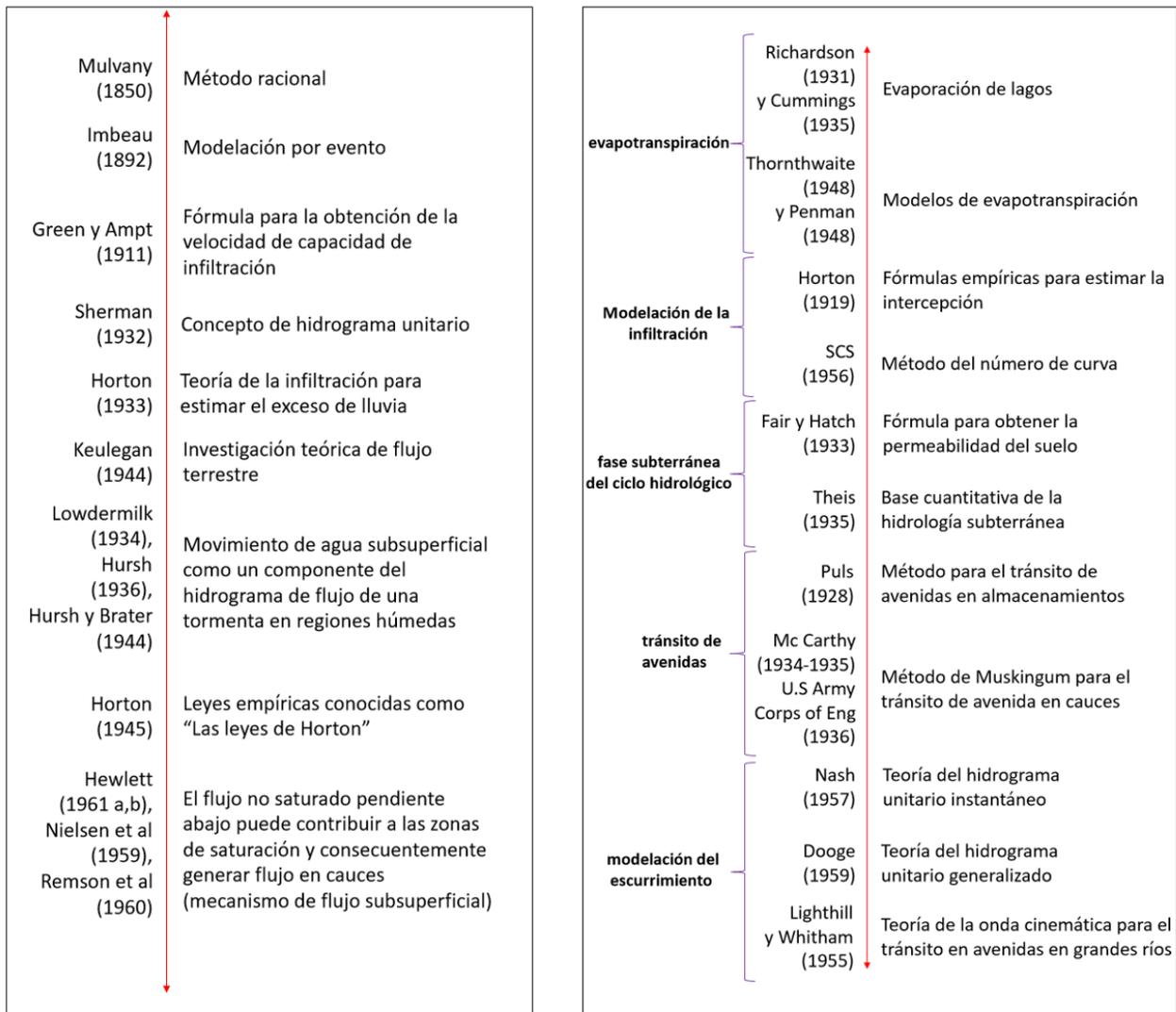
Lo que caracteriza a los modelos empíricos es la interpretación física (pequeña) de la realidad mediante los parámetros que utiliza, mientras que los teóricos sí se asemejan a lo que pretenden mostrar, pues han tomado de este lugar los datos necesarios para hacer la representación. Por otro lado, los modelos conceptuales al recabar información basada en la realidad se diferencian de los segundos, debido a su eficacia y simplicidad en la evaluación de las variables (Xu, 2002).

Un modelo lineal debe cumplir un principio para ser considerado dentro de esta clasificación, acorde con la teoría de sistemas la superposición es la condición específica; los parámetros de entrada y salida en su representación dentro de la regresión estadística debe ser lineal (Clarke, 1973). Los modelos agrupados y distribuidos están determinados por su representación espacial; si se considera una cuenca como un todo homogéneo, es un modelo agrupado.

Lo que diferencia a un modelo determinístico de uno estocástico, según Kisiel (1969), es la ocurrencia de las variables y la probabilidad; en el ciclo hidrológico. El modelo determinístico emplea expresiones matemáticas para representar las variaciones sin considerar la aleatoriedad, en tanto que el modelo estocástico emplea datos registrados en combinación con la probabilidad de que ocurran los eventos, por lo tanto, son parcialmente aleatorios (Chow *et al.*, 1988).

El inicio de la modelación hidrológica puede identificarse a partir del siglo XIX con el desarrollo de la ingeniería civil; que hasta mediados de 1960 involucraba básicamente conceptos, teorías y modelos de los componentes individuales del ciclo hidrológico. Algunos de estos componentes son: flujo en superficie, flujo en canales, infiltración, almacenamiento en depresiones, evaporación, intercepción, flujo subsuperficial y flujo base. Así, el mecanismo Hortoniano, el

mecanismo de flujo subsuperficial Hortoniano y las contribuciones parciales fueron reconocidas posteriormente como contribuyentes del escurrimiento (Singh y Woolhiser, 2002). En la Figura 1 se observan dos líneas de tiempo que esquematizan el origen y evolución de la modelación matemática, elaboradas en este estudio a partir de la descripción que realizan Singh y Woolhiser (2002).



**Figura 1. Cronología de la modelación matemática (elaboración propia a partir de Singh y Woolhiser, 2002).**

## 4.2. La ecuación de balance hídrico

La ecuación del balance hídrico es aplicable en todas las escalas de espacio y tiempo, desde estudios de infiltración rápida en una columna de suelo de laboratorio hasta investigaciones de sequías a escala continental durante períodos de décadas o siglos. Esta ecuación establece que la diferencia entre las tasas de agua que entran y salen de una unidad de contabilidad se equilibra con un cambio en el almacenamiento de agua (Healy *et al.*, 2007). En general, en una cuenca hidrológica, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden: la precipitación ( $P$ ) (en forma de lluvia o nieve) sobre la superficie del suelo, el agua superficial y subterránea que ingresa a la cuenca, conocida también como masa de agua desde fuera ( $Q_{sl}$  y  $Q_{ul}$ ). Respecto a las salidas en la ecuación, están la evaporación desde la superficie ( $E$ ) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada ( $Q_{s0}$  y  $Q_{u0}$ ). Cuando la cantidad de agua que ingresa supera a la que sale, el volumen de agua almacenada ( $\Delta S$ ) aumenta, al ocurrir lo contrario, esta disminuye. La ecuación del balance debe incluir un término residual o de diferencia ( $v$ ), debido a que los elementos del balance están sujetos a errores de estimación o medida. Por tanto, el balance hídrico para cualquier periodo, en su forma más general, estará representado por la siguiente ecuación (UNESCO, 1981):

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{s0} - Q_{u0} - \Delta S - v = 0 \quad (1)$$

La ecuación general del balance hídrico del suelo (que usa del modelo SWAT entre otros), de acuerdo con Neitsch *et al.* (2011) es:

$$CA_f = CA_0 + \sum (P_{dia} - Q_{sup} - E_a - A_{inf} - Q_b) \quad (2)$$

$CA_f$ , es el contenido final agua en el suelo (mm H<sub>2</sub>O)

$CA_0$ , es el contenido inicial de agua en el suelo en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$P_{día}$ , es la cantidad de precipitación en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{sup}$ , es la cantidad de escurrimiento superficial en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$E_a$ , es la cantidad de evapotranspiración en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$A_{inf}$ , es la cantidad de agua se infiltra en el perfil del suelo en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_b$ , es el flujo de agua subterránea o flujo base, al canal principal en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

Dado lo anterior, los elementos fundamentales de los que se compone el balance son: precipitación, escurrimiento, evapotranspiración y agua subterránea.

### **4.3. Software disponible para la realización del balance hídrico**

Vargas *et al.* (2015), muestran los modelos hidrológicos vigentes, producto de revisión en revistas de divulgación científica y otros identificados por ellos. El 0, presenta un resumen de dichos modelos, agrupados por tipo de simulación (continua o por evento).

**Cuadro 2. Algunos modelos lluvia-escorrentamiento vigentes (generado a partir del elaborado por Vargas *et al.*, 2015).**

<b>SIMULACIÓN CONTINUA</b>	<b>SIMULACIÓN DE EVENTOS</b>
SWMM (Storm Water Management Model)	USDAHL (USDA Hydrograph Laboratory)
TOP MODEL	HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)
ARNO	RORB
WAT FLOOD	DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model) **
SWAT ( <i>Soil and Water Assessment Tool</i> )	SEFM (Stochastic Event Flood Model) **
HYDRO TEL	<b>SIMULACIÓN CONTINUA Y EVENTOS:</b>
HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)	USGS-PRMS (USGS-Precipitation Runoff Modeling System)
CEQUEAU (Centre Québécois des Sciences de l'Eau)	MIKE-SHE (Mike-Systeme Hydrologique Europee) **
BWBM (Bochum Water Balance Model)	
IWFM (Integrated Water Flow Model)	
OWLS (Object Watershed Link Simulation)	

\*\*Modelos que requieren la compra de licencia para su uso.

De entre los modelos del Cuadro 2, el modelo SWAT constituye un instrumento para cuantificar las variables que intervienen en el balance hidrológico de una cuenca, ya que ayuda a conocer el comportamiento hidrológico, a partir de la determinación de áreas prioritarias para la regeneración del ecosistema. Dado lo anterior, se puede estar en posibilidad de mejorar el manejo del recurso hídrico en la cuenca y evitar problemas de sedimentación o inundaciones hacia aguas abajo (Hurtado y Yáñez, 2014).

El SWAT es considerado un PRMS (Sistema de Modelación de Precipitación-Escorrentamiento), de parámetros distribuidos y basado en procesos físicos que se utiliza para evaluar la respuesta de diferentes combinaciones de clima y uso de suelo en el flujo de los arroyos y la hidrología general de las cuencas. También es un modelo a escala de cuenca hidrográfica empleado en la simulación de la calidad y cantidad del agua (superficial y subterránea) y predecir el impacto ambiental del uso de suelo, el cambio climático y las prácticas de gestión del suelo (Texas A&M University and US Bureau of Reclamation, 2020). El modelo SWAT se usa también para evaluar la prevención y el control de la erosión, el control de fuentes de contaminación difusas y la gestión en las cuencas hidrográficas; y es capaz de realizar una simulación de manera continua durante largos períodos. Aunque el modelo se puede ejecutar en un paso de tiempo diario cuando se emplea el método de número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para calcular la escorrentía superficial, los resultados de la simulación se pueden informar sobre una base diaria, mensual o anual (Zhang *et al.*, 2013). Este modelo ha sido usado para cuantificar el impacto del cambio climático en el balance hídrico de una cuenca y en otros estudios para la identificación de relaciones agua-vegetación, observando la respuesta de los componentes del balance hídrico al cambio de la cobertura del suelo (Shawul *et al.*, 2019). Estudios como los de Marín *et al.*, (2020) y Wang *et al.* (2020) en donde, mediante una revisión, evalúan el desempeño de la aplicabilidad en pequeñas cuencas boscosas con superficies menores a 1000 km<sup>2</sup>, aseveran que el desempeño de dicho modelo varía entre satisfactorio y bueno, y que sus limitaciones están relacionadas con la precisión de los datos climáticos empleados y el período de tiempo de la validación.

#### **4.4. Datos de entrada al modelo SWAT**

En el Cuadro 3 se enlistan los elementos principales que conforman el balance, junto con los métodos de cálculo y fuente donde se puede consultar el fundamento de cada uno, elaborado a

partir de la descripción presente en el Documento Teórico del programa, publicado por Neitsch *et al.* (2011).

**Cuadro 3. Métodos hidrológicos de cálculo del modelo SWAT**

Elemento a calcular	Método de cálculo	Fuente
Esguerrimiento superficial	Número de Curva SCS	SCS, 1972.
	Método de Infiltración de Green & Ampt	Green & Ampt, 1911; Green & Ampt Mein-Larson 1973.
Gasto pico	Método Racional Modificado SCS TR-55	Chow <i>et al.</i> , 1994.
Evapotranspiración	Penman-Monteith <sup>1</sup> Priestley-Taylor <sup>2</sup> Hargreaves <sup>3</sup>	Penman-Monteith, 1965. Priestley and Taylor, 1972. Hargreaves <i>et al.</i> , 1985.
Flujo lateral	Modelo de almacenamiento cinemático para flujo subterráneo	Sloan <i>et al.</i> (1983) modificado por Sloan y Moore (1984).
Agua subterránea	4	Arnold <i>et al.</i> , 1993.
Flujo Base	-	Hooghoudth, 1940; Smedema and Rycroft, 1983.

<sup>1</sup>: Requiere datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, <sup>2</sup>: Requiere radiación solar, temperatura y velocidad del viento. <sup>3</sup>: Requiere solo datos de temperatura. <sup>4</sup> SWAT simula dos acuíferos en cada subcuenca, el acuífero poco profundo es un acuífero no confinado; el agua que ingresa al acuífero profundo se asume que contribuye al flujo de la corriente en algún lugar fuera de la cuenca. Fuente: Elaborado a partir de la descripción de Neitsch *et al.*, (2011).

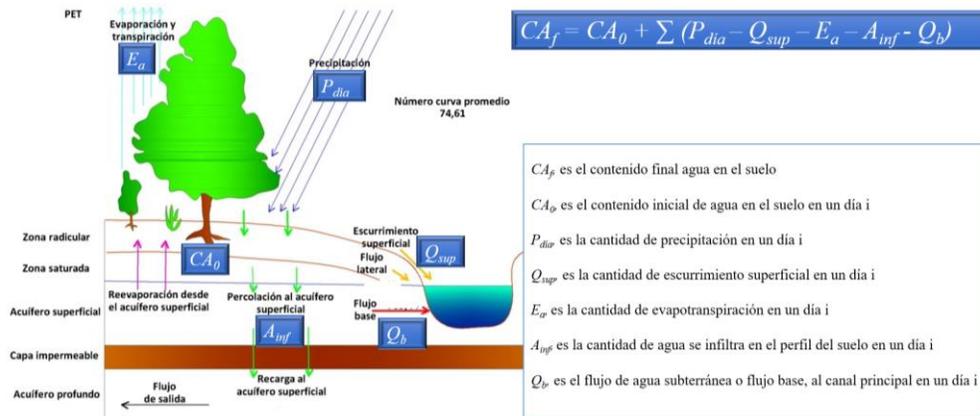
**Datos de entrada en formato ráster.** Modelo Digital de Elevaciones (DEM), Uso de Suelo y Vegetación (USV) y tipo de suelo.

**Datos de entrada en archivos de texto (tablas).** Localización de puntos para datos de clima (precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar, entre otros), atributos de USV (con el código interno de la Base de datos de SWAT para cada uso), atributos de suelos (nombre, textura, contenido de humedad, entre otros), datos de precipitación (diaria) y datos de temperatura.

La información de precipitación es un insumo fundamental para el modelo, al ser una entrada en el balance, cualquier error en sus datos podría transferirse a los resultados del modelo, dando lugar a criterios y decisiones erróneas (Tan y Yang, 2020). La determinación del área de influencia de cada estación es otro aspecto a considerar, se ha comprobado que los polígonos de Thiessen estiman de manera efectiva la precipitación media (Aragón *et al.*, 2019).

#### 4.5. Resultados del Modelo SWAT

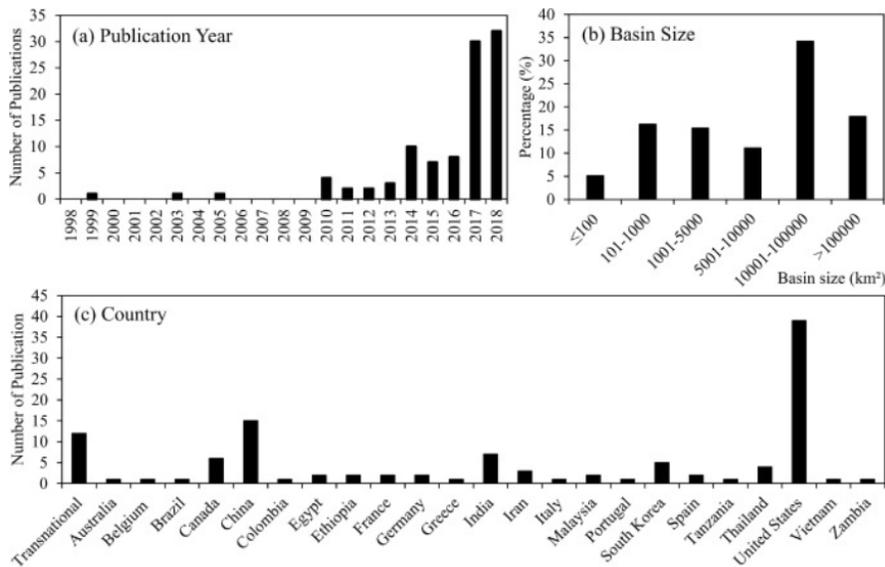
Los parámetros distribuidos en un sistema de modelación Precipitación-Escorrentamiento (PRMS), como lo es SWAT, se definen al dividir una cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRU); a partir de los atributos físicos de la misma, como la elevación de la superficie terrestre, la pendiente y el aspecto, el tipo de vegetación, el tipo de suelo y los patrones climáticos espacio-temporales. Dichos atributos físicos y la respuesta hidrológica de cada HRU, el modelo los asume homogéneos, y **calcula de forma diaria, mensual y anual el balance hídrico para cada HRU**. La suma de las respuestas de todas las HRU, ponderadas por unidad de área, produce la respuesta diaria de la cuenca en la configuración más básica (Texas A&M University and US Bureau of Reclamation, 2020).



**Figura 2. Esquema del balance y resultados de salida en SWAT (adaptado de Neitsch *et al.*, 2011).**

#### 4.6. Aplicaciones de SWAT en estudios publicados

Tan *et al.* (2020) realizaron una revisión de las aplicaciones del SWAT, encontrando que, con casi 4000 publicaciones, que es uno de los modelos ecohidrológicos más empleados en todo el mundo. Estos autores indican que desde 1999 se han identificado un total de 111 artículos, la mayoría realizados en los Estados Unidos y China, que por su objetivo se pueden dividir en evaluaciones de caudales extremos, estudios de sequía, estudios de inundaciones, estudios de sequía e inundaciones, acoplamiento SWAT con otros modelos y mejoras al SWAT. Encontraron también, que el 52% de los estudios analizados se realizaron para cuencas hidrográficas que drenan más de 10 000 km<sup>2</sup> lo que, a su juicio, demuestra la necesidad de comprender los efectos de posibles cambios extremos en la hidrología de cuencas de mediana a gran escala. La Figura 3 muestra tres gráficas en las que se observa de manera cuantitativa y porcentual el número de publicaciones de extremos hidro-climáticos modelados con SWAT; con base en publicaciones anuales, por tamaño de cuenca y por país que lo ha realizado.



**Figura 3. Publicaciones de extremos hidro-climáticos con SWAT, con base en publicaciones anuales (a), tamaño de cuenca (b) y países (c), (Tan *et al.*, 2020).**

En contraste al análisis anterior (de estudios realizados a cuencas grandes), Marín *et. al.* (2020) presentan un trabajo en el que, mediante una revisión, evalúan el desempeño de la aplicabilidad del SWAT en pequeñas cuencas boscosas (menores a 1000 km<sup>2</sup>). De los estudios analizados, se encontraron 9 en Europa, 7 en Estados Unidos y 11 en Asia; los procesos en los que se enfocaron fue escurrimiento, descarga y dinámica de sedimentos bajo escenarios de cambio climático y cambio en uso de suelo.

En el estudio, Marín *et. al.* (2020) aseveran, al igual que Wang *et al.* (2020), que el desempeño del modelo SWAT varía entre satisfactorio y bueno, y que normalmente subestima las descargas máximas diarias. Las limitaciones del modelo están relacionadas con la precisión de los datos climáticos y el período de tiempo utilizados para la validación. Los análisis de sensibilidad mostraron que el escurrimiento está influenciado principalmente por el suelo, el agua subterránea y los parámetros de crecimiento de las plantas. La dinámica de los recursos hídricos bajo el cambio climático varía según el intervalo de tiempo, el clima y los escenarios de uso de la tierra considerados. En el Cuadro 1 se presenta un listado de pronósticos separados en calidad y cantidad de agua bajo diferentes escenarios globales (de cambio climático) y locales (modificación específica de algún elemento del clima o de la vegetación), agrupados en periodos de tiempo, con la especificación del autor y año de publicación de cada trabajo.

**Cuadro 4. Pronósticos para la calidad y cantidad del agua bajo diferentes escenarios globales y locales aplicados a corto, mediano y largo plazo en la literatura revisada por pares, usando la herramienta SWAT (Marín *et. al.*, 2020).**

Autor (es)	Año de publicación	ESCENARIOS GLOBALES APLICADOS	ESCENARIOS LOCALES APLICADOS	Cantidad de agua	Calidad de agua	
				Flujo en corrientes %	Escurecimiento superficial %	Rendimiento del sedimento %
<b>años 2030s</b>						
Kalogeropoulos and Chalkias	2013	RCP4.5	Incremento en temperatura		-0.31; -81	
					-1.29	
			Disminución de precipitación		-6.85; -13.46	
			Escenarios combinados		-7.11; -14.3	
Zabaleta <i>et. al.</i>	2014	A2				-6; -18
		B2				-8; 95
Peraza-Castro <i>et. al.</i>	2018	RCP 4.5		-16		
				-21		
			Tala forestal en 10%	3		
				8		
				15		
		RCP 4.5	Tala forestal en 10%	-13		
			Tala forestal en 50%	-2		
RCP 8.5	Tala forestal en 10%	-18				
	Tala forestal en 50%	-5				

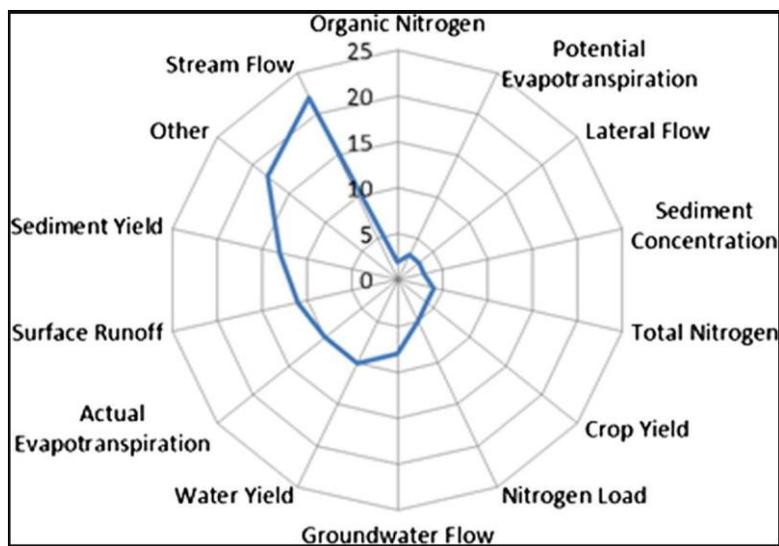
Autor (es)	Año de publicación	ESCENARIOS GLOBALES APLICADOS	ESCENARIOS LOCALES APLICADOS	Cantidad de agua	Calidad de agua	
				Flujo en corrientes %	Escurrimiento superficial %	Rendimiento del sedimento %
<b>años 2050s</b>						
Joh <i>et al.</i>	2011	A1B		-11		
		B1		-11.9		
Ahn <i>et al.</i>	2013	RCP 4.5		0.6		
		RCP 8.5		9.8		
Arias <i>et al.</i>	2014	A1B	Incremento en temperaturas	-13; 29		
			Disminución de precipitación	-9; -25		
			Incremento CO <sub>2</sub>	10		
			Escenarios combinados entre temperatura y precipitación	-16		
			Escenarios combinados entre temperatura, precipitación y CO <sub>2</sub>	-46		
Zabaleta <i>et al.</i>	2014	A2				-11; -37
		B2				-16; 190
Rodríguez-Blanco <i>et al.</i>	2016	A1B	Incremento en temperaturas			-1
			Disminución de precipitación			-9; -20

Autor (es)	Año de publicación	ESCENARIOS GLOBALES APLICADOS	ESCENARIOS LOCALES APLICADOS	Cantidad de agua	Calidad de agua	
				Flujo en corrientes %	Escurrimiento superficial %	Rendimiento del sedimento %
			Incremento CO <sub>2</sub>			3
			Escenarios combinados entre temperatura, precipitación y CO <sub>2</sub>			-11; -42
Senent-Aparicio <i>et al.</i>	2017	RCP 4.5		+4; -35		
		RCP 8.5		-11; -28		
Leta <i>et al.</i>	2018	RCP 4.5	Modificación de la precipitación	-25.4; 5.4		
			Modificación de la precipitación y temperatura	-29.3; 4.4		
			Modificación de la Radiación solar	-30.8; 4.4		
		RCP 8.5	Modificación de la precipitación	-27.1; 11		
			Modificación de la precipitación y temperatura	-32.6; 8.5		
			Modificación de la Radiación solar	-34.8; 8.7		
Sharannya <i>et al.</i>	2018	RCP 4.5		2.56		
<b>años 2080s</b>						

Autor (es)	Año de publicación	ESCENARIOS GLOBALES APLICADOS	ESCENARIOS LOCALES APLICADOS	Cantidad de agua	Calidad de agua	
				Flujo en corrientes %	Escurrimiento superficial %	Rendimiento del sedimento %
Joh <i>et al.</i>	2011	A1B		-16.1		
		B1		-18		
Perazzoli <i>et al.</i>	2013	A2		-39.2	-39.3	
		B2		-41.25	-40.8	
Ahn <i>et al.</i>	2013	RCP 4.5		14		
		RCP 8.5		15.7		
Arias <i>et al.</i>	2014	A1B	Incremento de la temperatura	-29		
			Disminución de precipitación	-25		
			Incremento CO2	15		
			Escenarios combinados de temperatura, precipitación y CO2.	-51		
Zabaleta <i>et al.</i>	2014	A2				-17; -55
		B2				-25; 285
Serpa <i>et al.</i>	2015	A1B	Escenarios de cambio climático	-13	-14	-11; 24
			Escenarios de uso de suelo	3	6	-18; 257
			Clima y uso de suelo	-8	-13	-29; 222
			Escenarios de cambio climático	-13	-18	-9; 22

Autor (es)	Año de publicación	ESCENARIOS GLOBALES APLICADOS	ESCENARIOS LOCALES APLICADOS	Cantidad de agua	Calidad de agua	
				Flujo en corrientes %	Escurrimiento superficial %	Rendimiento del sedimento %
Rodríguez-Blanco <i>et al.</i>	2016	B1	Escenarios de uso de suelo	3	1	-10; 9
			Clima y uso de suelo	-12	-18	-22; 5
		A1B	Incremento de la temperatura			-8
			Disminución de precipitación			-25; -36
			Incremento CO2			10
Escenarios combinados entre temperatura, precipitación y CO2	-2	-23	-8; -39			
Senet-Aparicio <i>et al.</i>	2017	RCP 4.5		-33	-54	
		RCP 8.5				

Francesconi *et al.* (2016) realizaron una revisión para identificar los estudios en los que se utilizó SWAT, específicamente para cuantificar los Servicios Ecosistémicos (SE), en términos de aprovisionamiento, regulación, apoyo y aspectos culturales. Identificaron 44 publicaciones, de las cuales, 34% empleó este *software* para cuantificar los servicios de aprovisionamiento, 27% los de regulación y 25 % ambos. En la Figura 4 se presentan las variables de salida más comunes, para la interpretación de SE, donde se aprecia que la producción de cantidad de agua más común fue el flujo en corriente, ya que las publicaciones que evalúan los servicios de regulación estaban interesadas en analizar la calidad del agua para evaluar los procesos de contaminación/purificación de ésta.



\* El término "Otro" compila varios resultados que individualmente contribuyen menos del 2% en su frecuencia de uso (Francesconi *et al.*, 2016).

**Figura 4. Variables de salida más comunes en SWAT, utilizadas para la interpretación de Servicios Ecosistémicos.**

#### **4.7. Calibración**

La calibración, ayuda en la determinación del modelo idóneo para una aplicación en particular, derivado de la precisión en las condiciones planteadas; un modelo en sí mismo, sin ser calibrado, no puede garantizar la réplica de un sistema real (Yang, 2016) y, por lo tanto, no es confiable ni debe ser utilizado en la toma de decisiones. Con el desarrollo de los SIG a la par de los modelos hidrológicos, la visualización y análisis de los elementos que intervienen en el ciclo hidrológico ha mejorado, al igual que el procedimiento para su calibración. En los primeros estudios con el modelo SWAT, la calibración se realizaba a “prueba y error”, modificando parámetros dentro del mismo. Como ejemplo, en el estudio realizado por Trucios *et al.* (2007) a la cuenca del río Sextin, en Durango, calibraron su modelo modificando parámetros como la Curva Numérica y el grupo hidrológico, y obtuvieron coeficientes de Nash – Sutcliffe entre 0.69 y 0.87.

En la actualidad, existen programas como *SWAT-CUP* que ofrece varias opciones para el análisis de sensibilidad, calibración, validación y análisis de incertidumbre. El programa incluye cinco algoritmos: Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2), Probabilidad de Incertidumbre Generalizada (GLUE), Solución de Parámetros (ParaSol) y los Métodos de Inferencia Bayesiana (MCMC). Con el enfoque semiutomático (SUFI-2) se pueden ajustar manualmente los parámetros, y varía iterativamente entre ejecuciones de autocalibración (Arnold *et al.*, 2012b). El algoritmo SUFI-2, ha sido empleado en gran cantidad de estudios, con resultados satisfactorios, tales como los realizados por Mendoça *et al.* (2020) o el de Kuti & Ewemoje (2021), entre otros.

#### **4.8. Resumen**

Muchos de los modelos de simulación que se usan actualmente son muy completos, de parámetros distribuidos y con bases físicas, como lo es SWAT, por lo que son capaces de simular con precisión

los procesos hidrológicos a nivel de cuencas hidrográficas. Por su alcance y versatilidad se pueden aplicar para modelar una gran variedad de problemas ambientales y de recursos hídricos.

Realizar una calibración correcta es necesario al final de un proceso de modelación, y ésta consiste en estimar los parámetros del modelo comparando descargas observadas y simuladas, lo que resulta, la mayor parte del tiempo, en un desafío de optimización enfocado en mayores capacidades predictivas y reducción de la incertidumbre de la simulación (Seiller et al., 2017).

El uso de SWAT ha sido ampliamente probado en distintas áreas, con resultados y calibración favorables (Marín et. al., 2020; Wang et al., 2020); sin embargo, es necesario tener claro el objetivo para el que se emplea, la información requerida y recursos disponibles, así como la precisión espacial y temporal deseada para así sacar el mejor provecho a los resultados que ofrece (periodicidad diaria, mensual o anual).

Conocer los elementos que intervienen y afectan el balance hídrico y su equilibrio a nivel de una cuenca hidrográfica específica podrán, sin duda, ayudar a proponer medidas de prevención, con sentido y dirección claros, tomando en cuenta lo útil que resulta tomar lo mejor de la experiencia de quien ya ha aplicado las teorías y modelos existentes, como es el propósito del presente trabajo de investigación.

## **CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS**

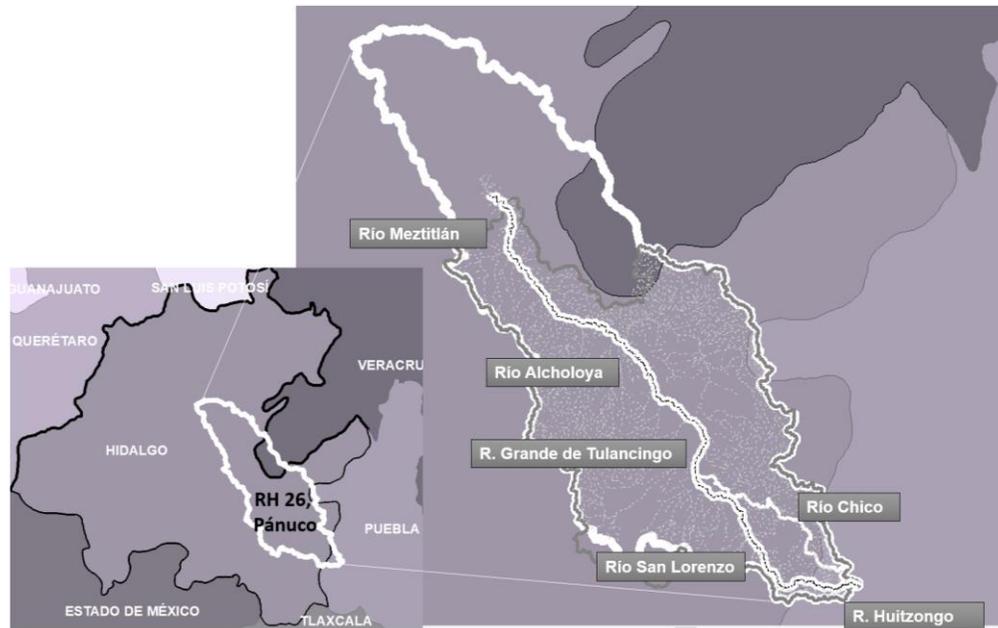
De manera general, el diagnóstico resultó del balance hidrológico realizado, en primera instancia a la cuenca denominada Venados, en donde se cuantificaron geoespacial y temporalmente los elementos con base en las características fisiográficas de la cuenca, cobertura vegetal histórica, propiedades del suelo, registros históricos de precipitación, temperatura, radiación, volúmenes de agua requeridos para los distintos usos, entre otros. La identificación de zonas deficitarias derivó en medidas para la conservación del recurso agua; para llegar a ellas, de acuerdo con los siguientes pasos:

- 1) Recopilación de la información requerida para alimentar el modelo SWAT
- 2) Calibración de sus resultados de acuerdo con la información hidrométrica disponible
- 3) Análisis de resultados
- 4) Medidas propuestas para la conservación del recurso.

### **5.1 Localización de la zona de estudio**

El área de la cuenca se ubica en la Región Hidrológica 26 “Río Pánuco”, subregión Alto Pánuco del río Moctezuma, cuenca alta del río Metztlán. La cuenca del río Tulancingo se sitúa en la porción noreste de la Mesa Central, entre 98° 10’ y 98° 55’ O y 19° 55’ y 20° 45’ N. El río Tulancingo nace en los límites de los estados de Hidalgo y Puebla, siendo conocido con el nombre de río Huitzongo, desciende hacia el noroeste y al pasar por la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, recibe por la margen derecha al Río Chico, en ese punto cambia a río Grande de Tulancingo; río Alcholoaya es como se le conoce al pasar ahora por esa localidad, y en el poblado de El Vite ya se

identifica como río Metztlán; cruza por la carretera federal 105 Pachuca-Huejutla bajo el puente de Venados, aguas abajo del poblado Vega de Metztlán (Can *et al.*, 2008), ver Figura 5.



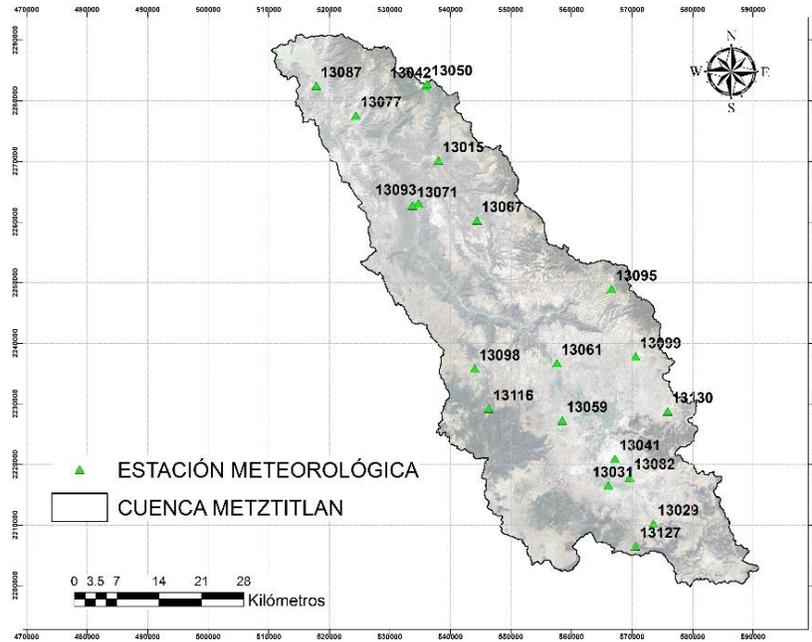
**Figura 5. Ubicación de la zona de estudio.**

El clima en el Valle de Tulancingo, de acuerdo con la clasificación de W. Köppen, modificada por Enriqueta García (2004), es semiseco-templado y hacia sus límites templado-subhúmedo, con lluvias en verano y valores promedio de temperatura, precipitación y evaporación potencial anuales de 15 °C, 532.1 mm y 1541.8 mm, respectivamente (DOF, 2015).

## **5.2 Elementos de entrada al modelo**

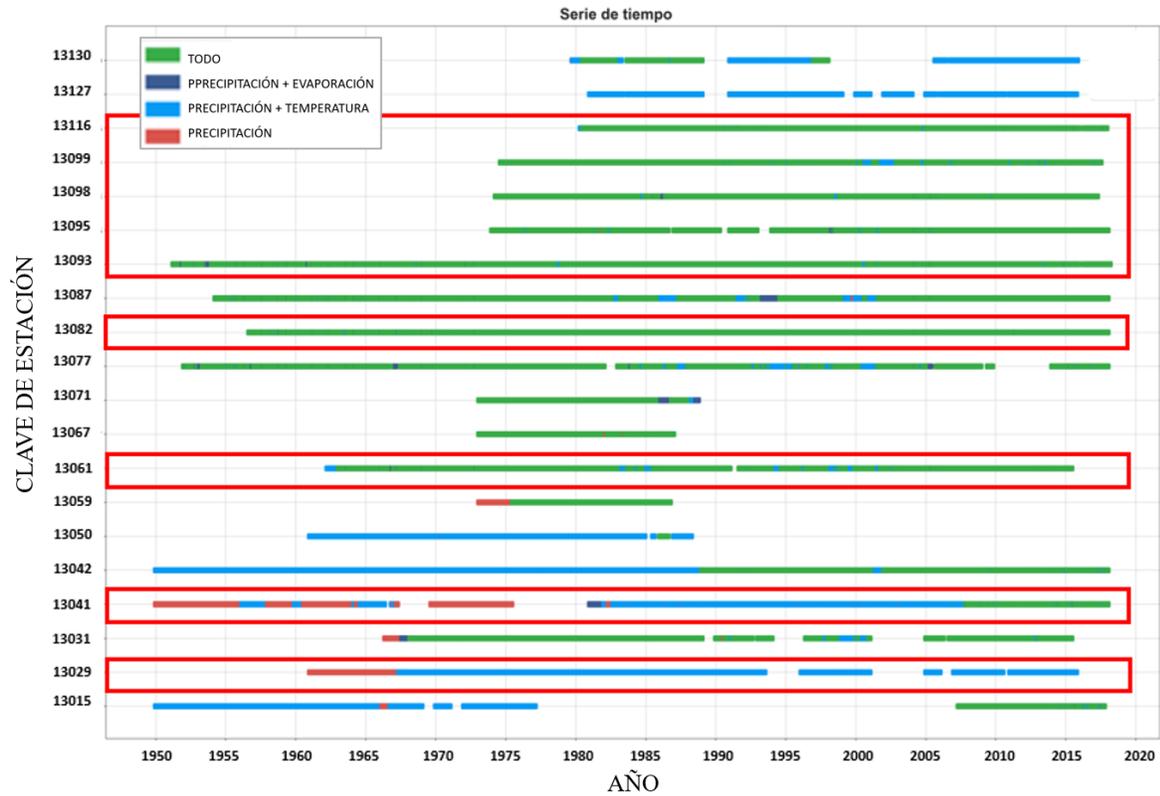
### **5.2.1 Datos climáticos**

Se identificaron un total de 20 estaciones climatológicas dentro de la cuenca del río Metztlán, cuya distribución se observa en la Figura 6.



**Figura 6. Estaciones climatológicas dentro de la cuenca del río Metztlán.**

Se seleccionaron nueve estaciones que se ubican dentro de la cuenca con salida hacia la estación hidrométrica Venados, cinco de ellas con influencia dentro de la cuenca Tulancingo; y con un periodo coincidente de información de 38 años (1980-2017) (ver Figura 7).



**Figura 7. Comparativa de los periodos de tiempo con información disponible por estación.**

La estimación de datos faltantes en las estaciones seleccionadas se realizó con el método del U.S National Weather Service (WS), que es el promedio obtenido con un factor ponderador (inverso de la distancia al cuadrado) (Chow *et al.*, 1994); debido a que ofrece mejores resultados que otros, como el radio normalizado, la media aritmética, regresión múltiple y regresión lineal (Barajas y Fuentes, 2017; Toro *et al.*, 2015). La determinación del área de influencia de cada estación se realizó mediante el método de polígonos de Thiessen (Figura 8), el cual ayuda a estimar de manera efectiva la precipitación media (Campos, 2011; Aragón *et al.*, 2019).

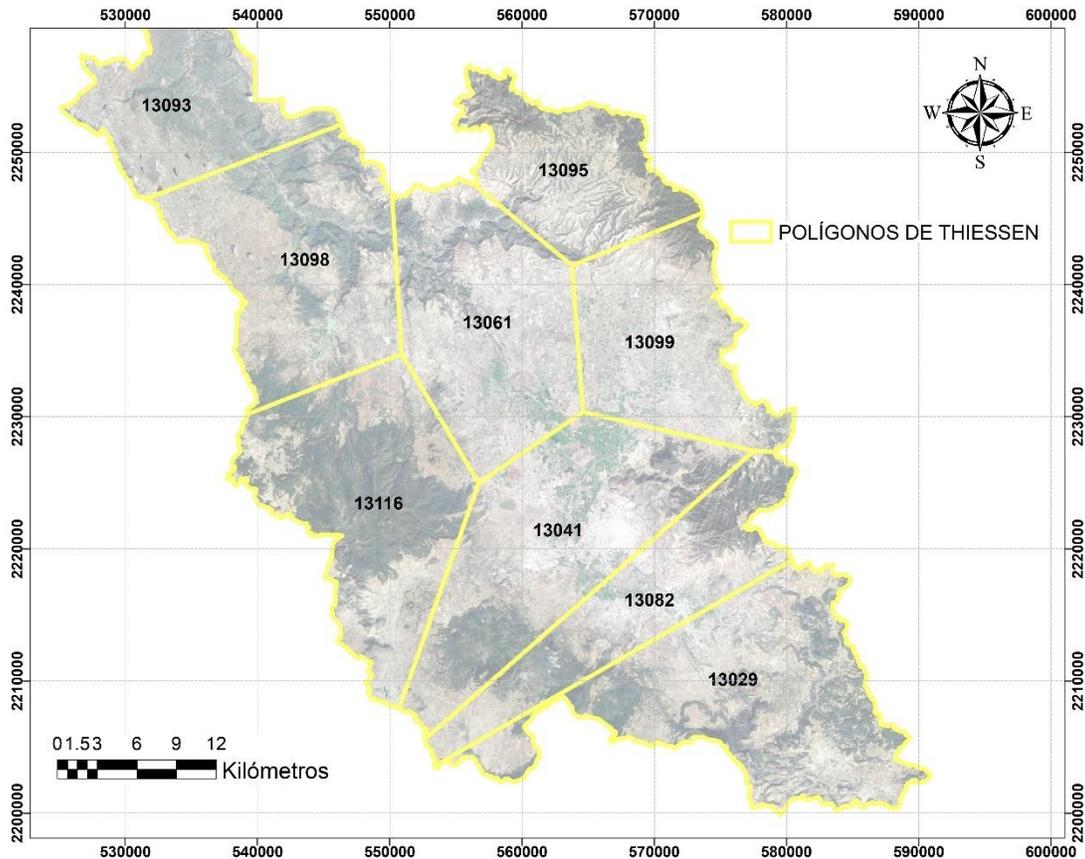
Para generar los datos estadísticos de precipitación y temperatura se utilizó la herramienta “SWAT Weather Database”, que calcula los valores estadísticos y genera los archivos de datos diarios que requiere el SWAT, las variables que se obtuvieron fueron las siguientes:

- TMPMX = Promedio de la temperatura máxima diaria por mes (°C).
- TMPMN = Promedio de la temperatura mínima diaria por mes (°C).
- TMPSTDMX = Desviación estándar de la temperatura máxima diaria por mes (°C).
- TMPSTDMN = Desviación estándar de la temperatura mínima diaria por mes (°C).
- PCP\_MM = Precipitación media mensual (mm).
- PCPSTD = Desviación estándar de la precipitación.
- PCPSKW = Coeficiente de sesgo de la precipitación.
- PR\_W1 = Probabilidad de un día húmedo después de un día seco.
- PR\_W2 = Probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo.
- PCPD = Promedio del número de días de precipitación en el mes.
- RAINHHMX = Lluvia máxima en media hora por mes (mm).

Los datos restantes fueron interpolados a partir de los datos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR, 2017).

- SOLARAV. Promedio de la radiación solar diaria por mes (MJ/m<sup>2</sup>/día).
- DEWPT. Promedio diario de la temperatura de punto de rocío por mes (°C).
- WNDV. Promedio diario de la velocidad del viento por mes (m/s).

La interpolación se hizo en ArcGIS utilizando el módulo: “*model builder*”.

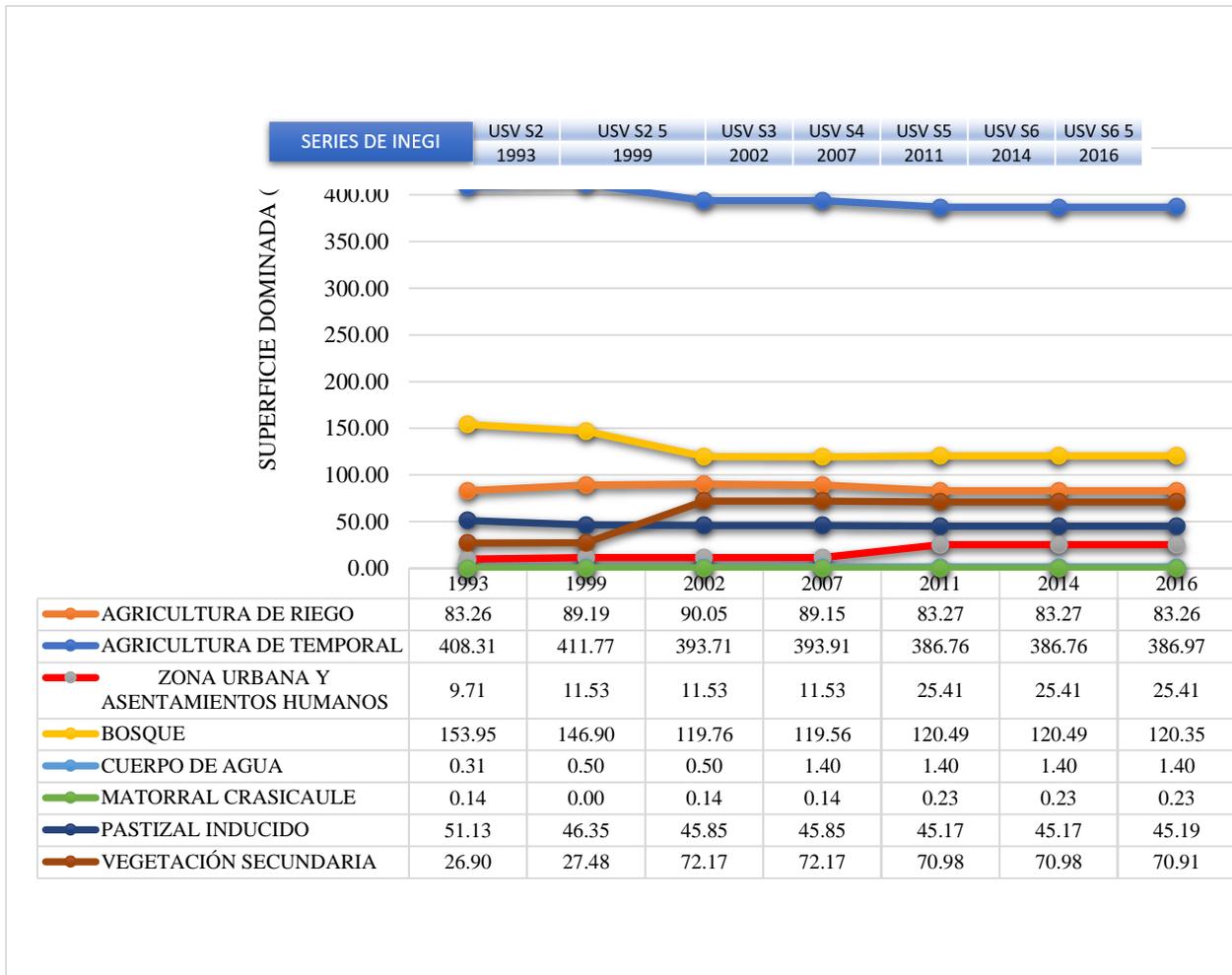


**Figura 8. Polígonos de Thiessen de las estaciones seleccionadas.**

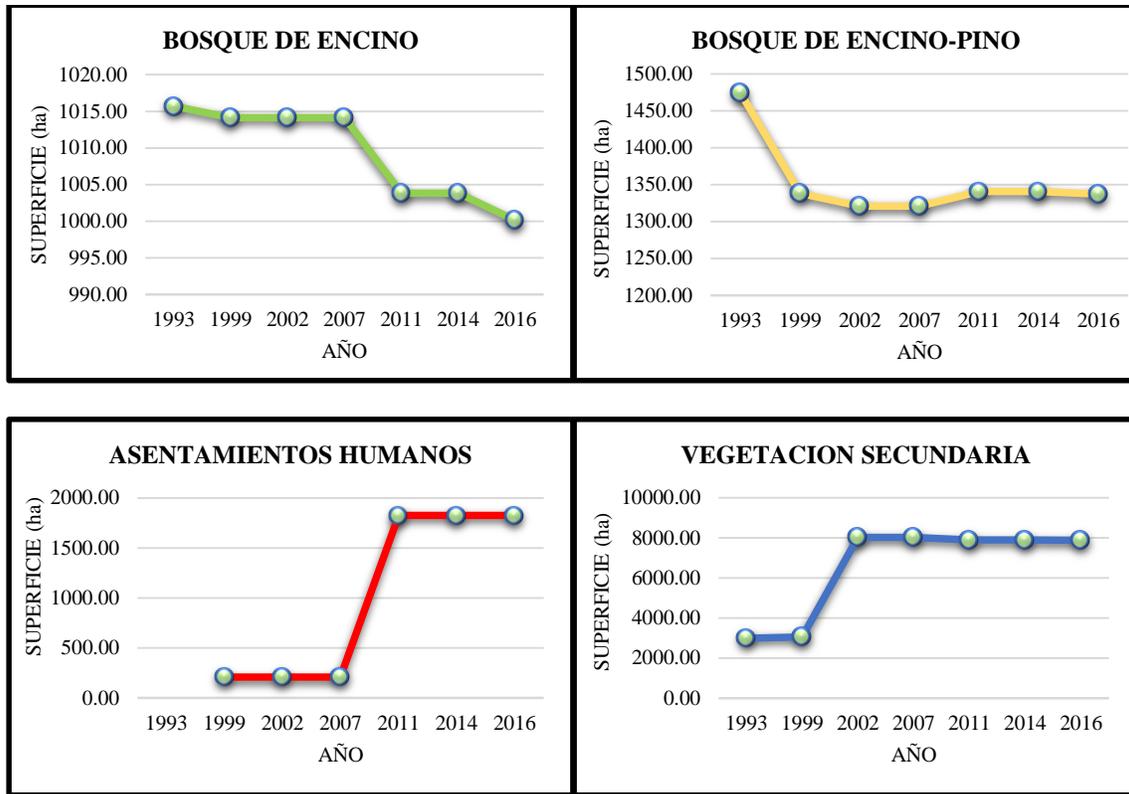
### 5.2.2 Uso de suelo y vegetación.

La variabilidad climática y el cambio de uso/cobertura del suelo tienen un impacto significativo en los regímenes hidrológicos, especialmente en regiones con problemas de escasez de agua (Bao *et al.*, 2019). Por lo que para identificar cambios de uso/cobertura de suelo que, a través del tiempo se han presentado dentro de la cuenca del Valle de Tulancingo, se analizaron siete coberturas de uso del suelo y vegetación (USV) denominadas Serie II (1993), Serie 2.5 (1999), Serie III (2002), Serie IV (2007), Serie V (2011), Serie VI (2014) y Serie 6.5 (2016), publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Programa Mexicano del Carbono.

De acuerdo con el comparativo general mostrado en la Figura 9, aparentemente no ha habido cambios considerables, sin embargo, hay que resaltar el hecho de que se trata de información a escala 1:250 000, donde el área mínima cartografiable en agricultura es de 25 ha y de vegetación de 50 ha (INEGI, 2017).



**Figura 9. Superficie por tipo de vegetación en la cuenca, Series INEGI.**



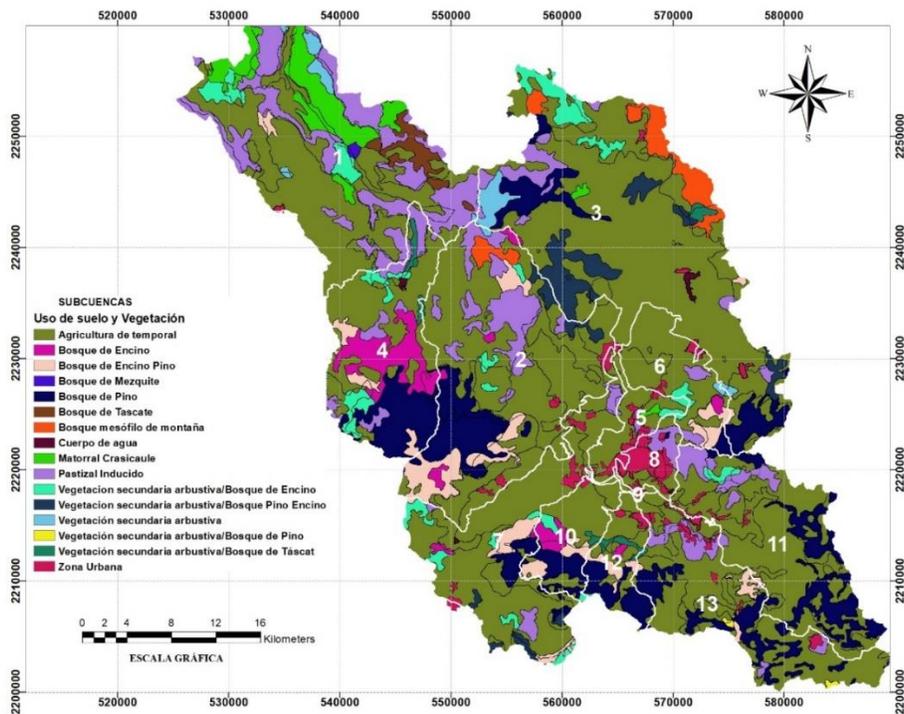
**Figura 10. Tipo de vegetación, cobertura vegetal y asentamientos humanos que presenta los mayores cambios.**

En la Figura 10, se presentan gráficas de los tipos de cobertura que observaron diferencias positivas y negativas más sobresalientes en el área de la cuenca. Y al respecto, cabe señalar la reducción de la superficie de Bosque de encino, así como de Bosque de encino-pino, junto con el incremento en vegetación secundaria (arborescente), indican una degradación de la vegetación primaria a vegetación secundaria, que no solo representa una pérdida en los almacenes de carbono, sino también un probable incremento en el volumen de escurrimiento en la cuenca del Río Tulancingo.

La aseveración anterior se basa en experiencias como la de Shawul *et al.* (2019), en la que evaluaron el efecto del cambio en la cobertura del suelo sobre los componentes del balance hídrico, encontrando que existe una gran correlación entre el bosque con el flujo de agua subterránea, es decir, que un incremento en el área forestal podría aumentar significativamente la recarga del agua

subterránea y, por ende, reducir el escurrimiento superficial. Además, encontraron que al incrementarse las tierras de cultivo y área urbana, se tienen influencia negativa sobre la recarga, aumentando también el escurrimiento. En consecuencia, para la cuenca en estudio, dada la reducción en la superficie primaria junto con el aumento de vegetación secundaria, zona urbana y asentamientos humanos, es de esperarse que el efecto sobre el escurrimiento vaya de menos a más, si se compara el USV de la serie II (1993) con el USV de la serie 3 a la 6.5 (2002-2016).

En la Figura 11 se presenta la distribución espacial inicial, asignada para el uso de suelo y vegetación en la zona de estudio completa, periodo de simulación (1980-2001). En el Cuadro 5 se presentan las superficies, así como el cambio relativo indicado en el primer mes del año 2002, para ser aplicado en el periodo 2002-2017, dentro del módulo de Edición de Actualizaciones de Uso de Suelo (Land Use Update Edit) del *software* SWAT.



**Figura 11. Distribución espacial de uso de suelo y vegetación en la zona de estudio, USV serie II del INEGI.**

**Cuadro 5. Cambios de uso de suelo y vegetación (USV), indicados en el modelo SWAT para los periodos de la simulación: 1980-2001 y 2002-2017, en km<sup>2</sup>.**

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	1980-2001	2002-2016	DIFERENCIA	
	USV S2 (1993)	USV S3 (2002)	km <sup>2</sup>	%
AGRICULTURA DE RIEGO	83.26	90.05	6.79	8.2
AGRICULTURA DE TEMPORAL	408.31	393.71	-14.60	-3.6
ZONA URBANA Y ASENTAMIENTOS HUMANOS	9.71	11.53	1.82	18.7
BOSQUE	153.95	119.76	-34.19	-22.2
CUERPO DE AGUA	0.31	0.50	0.19	60.2
MATORRAL CRASICAULE	0.14	0.14	0.00	0.0
PASTIZAL INDUCIDO	51.13	45.85	-5.28	-10.3
VEGETACIÓN SECUNDARIA	26.90	72.17	45.26	168.2

### 5.2.3 Tipo de suelo y sus características.

La distribución geoespacial de los tipos de suelo, presentes en la zona de estudio, al igual que sus atributos físicos y químicos, de acuerdo con la “base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés), es la Serie II del INEGI. Y se encuentra disponible para ser descargada de forma gratuita en formato vectorial. Esta distribución, apoyada de las características fisicoquímicas de que se dispone en el conjunto de datos de perfiles de suelo, en escala 1:250000, Serie II (también del INEGI), se corroboró mediante la toma de muestras de suelo en siete sitios distribuidos dentro de la cuenca, a los cuatro tipos de suelo que dominan el 92% de la superficie total (Figura 12), para ser analizados en laboratorio y obtener los datos: pH, conductividad eléctrica, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, textura, densidad aparente y contenido de humedad a saturación; valores que fueron incorporados como datos en la alimentación del modelo.

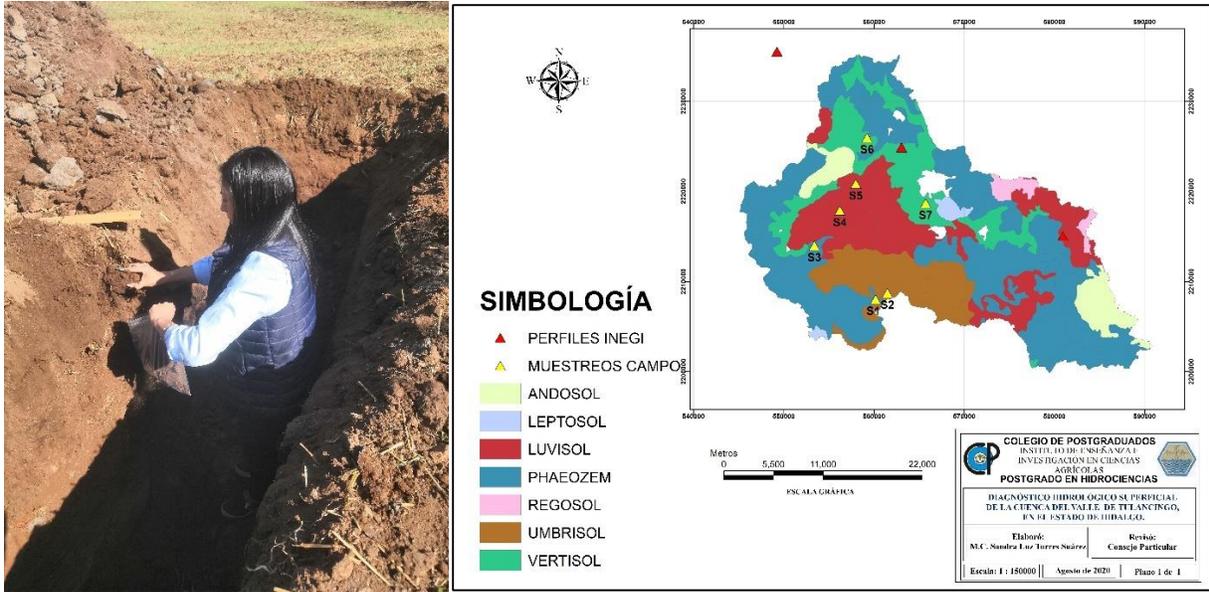


Figura 12. Sitios de muestreo para la determinación de características por tipo de suelo, predominantes en la zona de estudio.

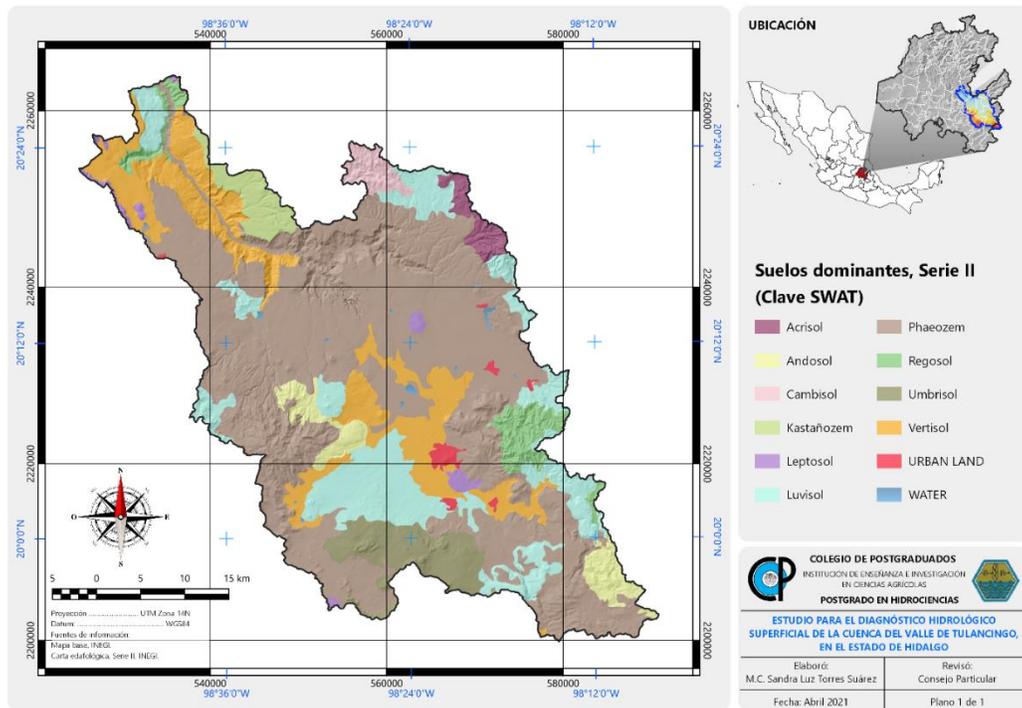
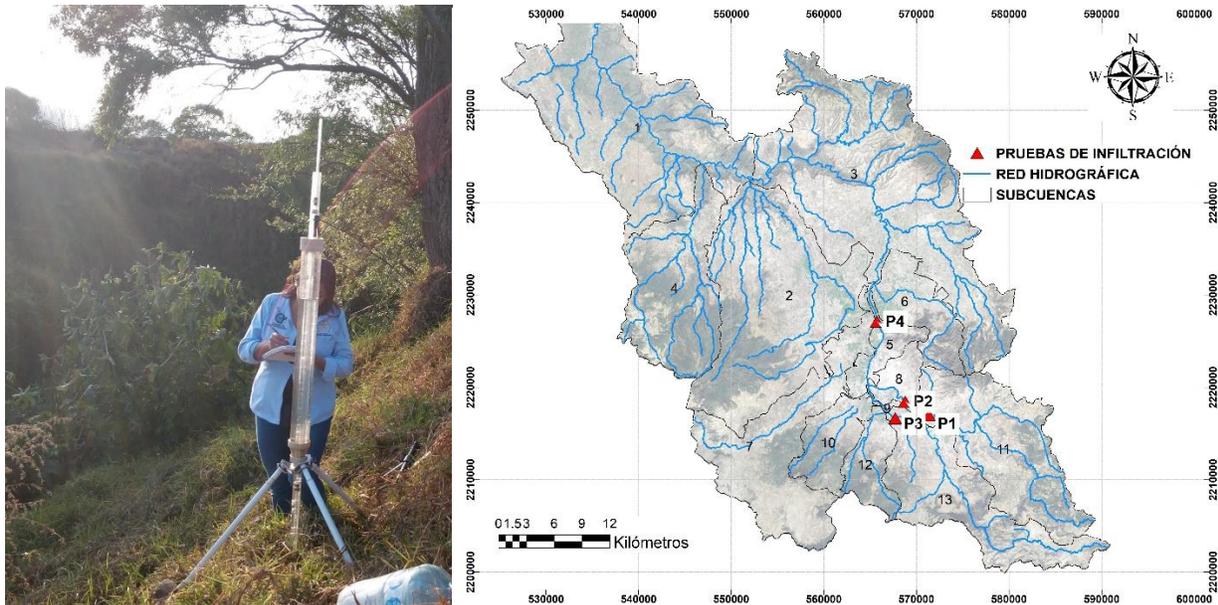


Figura 13. Distribución espacial de los tipos de suelo dentro de la cuenca.

Las pruebas de infiltración se realizaron con el permeámetro de Guelph modelo 2800K1, sobre el talud de las corrientes principales, en cuatro puntos definidos, como se puede observar en la Figura 14. Los valores de conductividad hidráulica en cada sitio se estimaron siguiendo la metodología especificada en Soilmoisture (2012); sus valores, así como la corriente principal de cada subcuenca a la que fueron asignados se presentan en el Cuadro 6.



**Figura 14. Sitios de pruebas de infiltración realizadas sobre taludes de los cauces principales.**

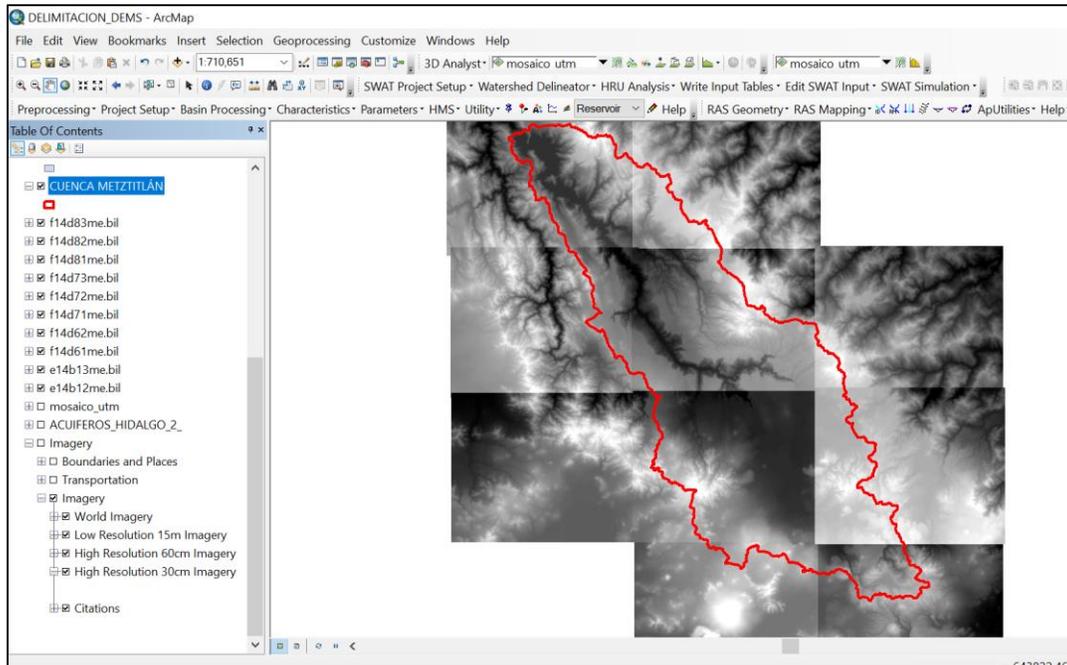
**Cuadro 6. Valores de conductividad hidráulica (K) asignados a la corriente principal de cada subcuenca.**

SITIO	K (mmh <sup>-1</sup> )	Subcuenca
P1	27.477	11
P2	13.738	8
P3	48.083	10, 12 y 13
P4	32.971	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9

#### 5.2.4 Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca y elaboración del mapa de pendientes, hacia el punto de salida ubicado en la estación hidrométrica Venados, se emplearon un total de 10 imágenes con resolución de 15 metros, pertenecientes al Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), que se

encuentra disponible para su descarga en la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Dichas imágenes en formato ráster contienen información de ubicación geográfica (coordenadas X, Y), asociada a su elevación (Z), en una malla de puntos distribuidos a una equidistancia regular (Figura 15).

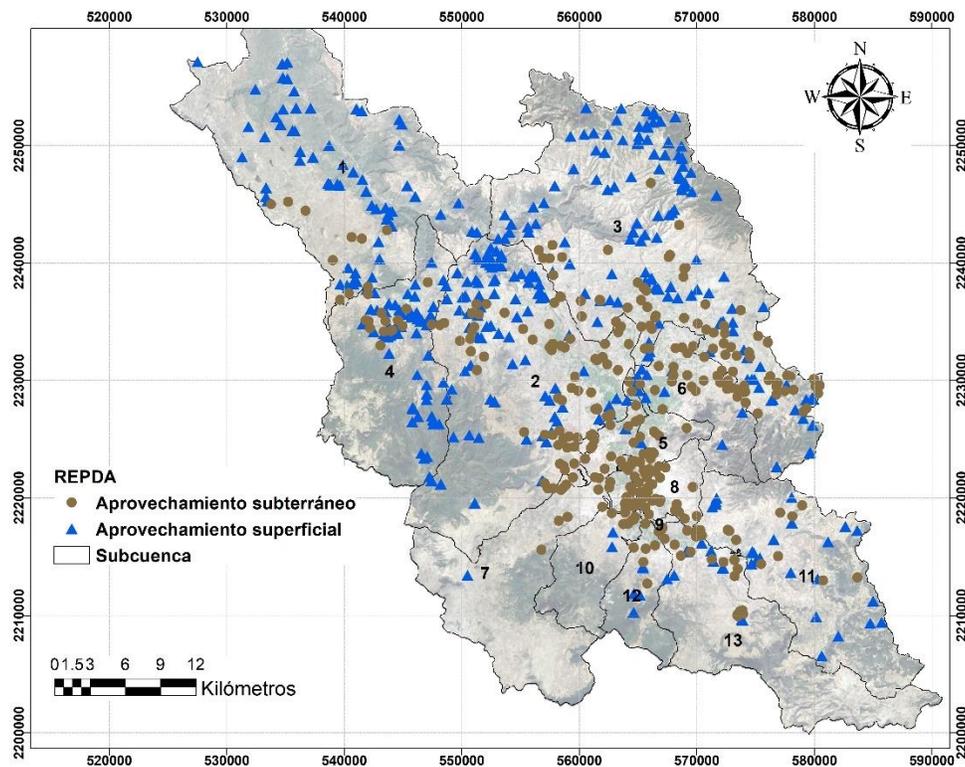


**Figura 15. Mosaico de imágenes (10), descargadas para la delimitación de la cuenca.**

### **5.2.5 Elementos que constituyen la demanda de agua**

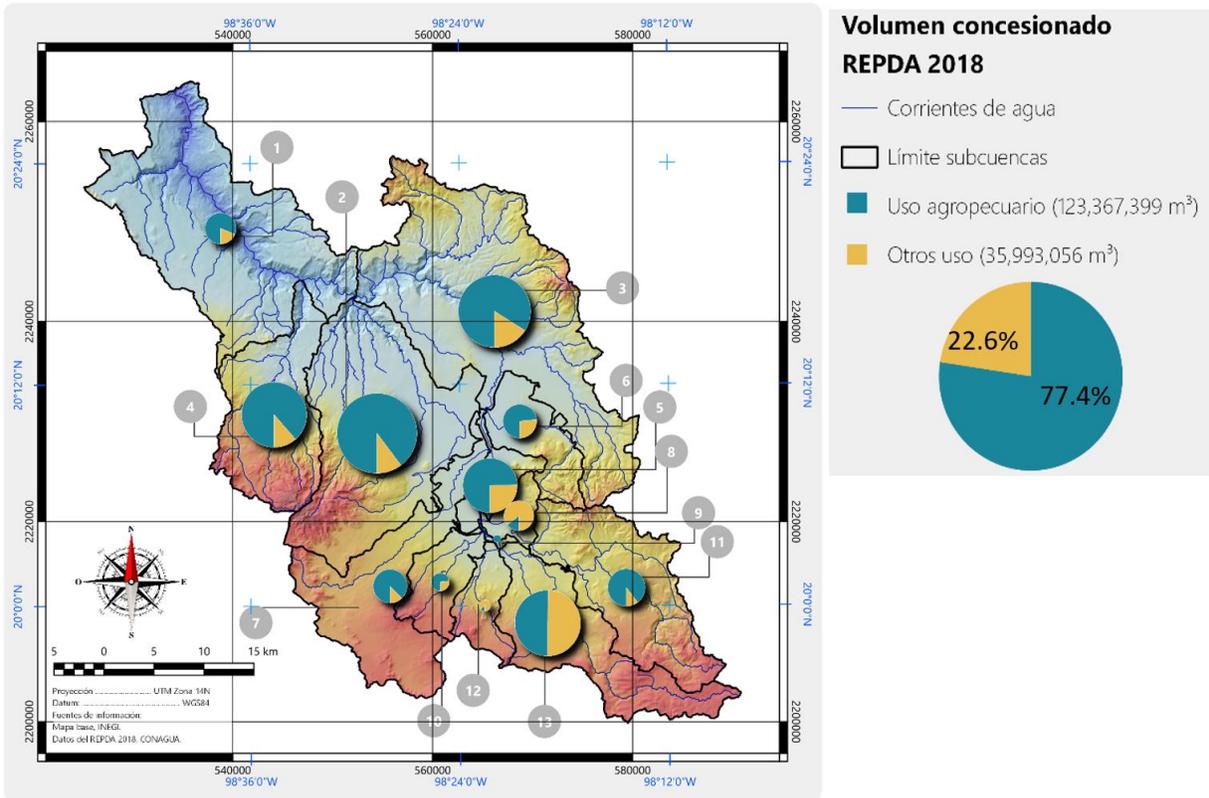
En este estudio, tanto para la estimación de la demanda de agua superficial como subterránea, se consideró la información del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). En este registro se encuentran los títulos y permisos de aguas nacionales que incluyen, entre otra información, el nombre del propietario, volumen concesionado, ubicación y tipo de uso para el que fue otorgado el permiso (REPGA, 2018). Al ubicar los pozos, cuyo aprovechamiento proviene de fuentes superficiales se pudo observar que éstos dominan en las subcuencas 1 y 2, mientras que los que

proviene de fuentes subterráneas se concentran principalmente en las subcuencas 5, 8 y 9 (al interior de la ciudad de Tulancingo) (ver Figura 16).



**Figura 16. Distribución geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas registradas en el REPDA dentro de la cuenca.**

En la Figura 17, se puede apreciar la dominancia en volumen concesionado que muestra el REPDA, el cual se tiene destinado a los usos agrícola y pecuario sobre los usos urbano e industrial, especificados en la imagen con la leyenda “otros usos” identificados para cada subcuenca.



**Figura 17. Distribución por uso del agua en la cuenca (REPDA, 2018).**

Dentro del modelo SWAT, los volúmenes concesionados por tipo de uso, se ingresaron como extracciones de la cuenca, en los módulos WURCH: remoción diaria promedio de agua del cauce indicada por mes (m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>), proveniente del cálculo para concesiones superficiales, y WUSHAL: remoción diaria promedio de agua del acuífero somero indicada por mes (m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>), obtenida para las concesiones de agua subterránea. Estos módulos se emplean para simular la extracción de agua para riego fuera de la cuenca hidrográfica o extracción de agua para uso urbano/industrial (Arnold *et al.*, 2011).

Al ofrecer el REPDA, volúmenes concesionados de manera anual, la proporcionalidad mensual para los usos agrícola y pecuario se estimó como una distribución promedio, calculada con las extracciones que el Distrito de Riego 028 presenta con fines de riego y el inverso de la

precipitación. Bajo el supuesto que cuando la lámina de precipitación es mayor, la cantidad de agua que se requiere suministrar con fines de riego es menor, el inverso de la precipitación se estimó calculando la proporción de la precipitación media mensual y ordenándola de mayor a menor. Posteriormente, al mes de mayor lámina de precipitación se le asignó la menor proporcionalidad, al segundo de mayor se le asignó el segundo menor, y así sucesivamente hasta colocar al mes de menor disponibilidad, la mayor proporcionalidad. Los porcentajes resultantes se presentan en el cuadro siguiente.

**Cuadro 7. Distribución mensual, en porcentaje, considerada para las extracciones de los usos: agrícola y pecuario.**

MES	INVERSO		EXTRACCIONES*	PROMEDIO
	PRECIPITACIÓN	PRECIP.		
	(a)	(b)	(c)	(b+c)/2
ENERO	1.8	15.4	11.8	13.6
FEBRERO	2.0	15.0	7.9	11.5
MARZO	2.6	14.8	22.4	18.6
ABRIL	5.0	8.1	12.3	10.2
MAYO	8.1	5.0	8.6	6.8
JUNIO	15.4	1.8	5.7	3.8
JULIO	15.0	2.0	6.4	4.2
AGOSTO	14.8	2.6	6.6	4.6
SEPTIEMBRE	20.5	1.1	2.5	1.8
OCTUBRE	10.6	3.1	1.6	2.4
NOVIEMBRE	3.1	10.6	5.8	8.2
DICIEMBRE	1.1	20.5	8.4	14.4
SUMA	100	100	100	100

\*Distribución porcentual de extracciones mensuales con fines de riego, obtenidas a partir de volúmenes proporcionados por autoridades del Distrito 028 Tulancingo, para el periodo 1988-2020.

En el caso de las extracciones mensuales de uso urbano/industrial, estas se distribuyeron equitativamente entre los 12 meses del año, dado que su demanda varía de acuerdo con factores como: clima, saneamiento, hábitos de la población, prácticas culturales, tipos de alimentos, etc.

(Torres *et al.*, 2019), pero cuando éstas se comparan entre regiones diferentes, más no en su demanda mensual, por tanto, en el presente trabajo se asumen constantes.

No toda el agua extraída se pierde, por lo que al existir volumen que se reincorpora a la red de drenaje de la cuenca (volumen de retornos) y que, para los casos donde no se cuenta con aforos, la CONAGUA en su Norma Oficial Mexicana: NOM-011-CONAGUA-2015 recomienda estimarla con un cuadro de porcentajes propuestos por tipo de uso al cual fue destinada (DOF,2015). Los volúmenes de extracción resultaron de la diferencia entre el volumen concesionado menos el volumen de retornos que, agrupados y ponderados para los usos agropecuario y urbano/industrial, fueron reducidos en un 55 % y 25 %, respectivamente.

Finalmente, los valores de remoción diaria promedio para las extracciones superficiales (Cuadro 8) y para las extracciones subterráneas (Cuadro 9), fueron incorporados al modelo SWAT.

**Cuadro 8. Volúmenes de remoción diaria promedio, de agua superficial por subcuenca (WURCH), m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>.**

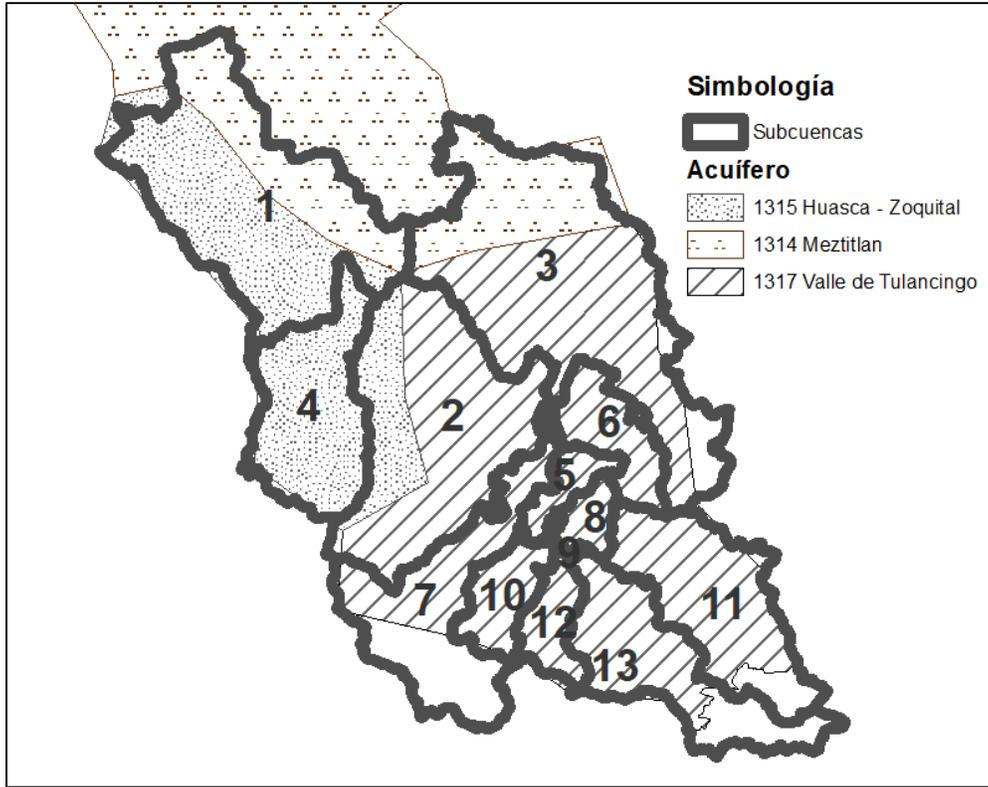
SUBCUENCA	Volúmenes mensuales (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> día <sup>-1</sup> )											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1.45	1.36	1.97	1.14	0.75	0.45	0.48	0.52	0.24	0.30	0.92	1.53
2	6.88	6.45	9.32	5.37	3.53	2.11	2.25	2.46	1.12	1.36	4.35	7.27
3	3.56	3.37	4.75	2.83	1.93	1.24	1.31	1.40	0.76	0.87	2.33	3.75
4	3.76	3.53	5.08	2.94	1.95	1.18	1.26	1.37	0.64	0.78	2.39	3.97
5	1.42	1.32	1.93	1.10	0.71	0.41	0.44	0.49	0.20	0.26	0.88	1.50
6	0.11	0.11	0.15	0.09	0.06	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.07	0.12
7	0.11	0.10	0.14	0.08	0.05	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02	0.07	0.11
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.04	0.04	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04
11	2.13	1.99	2.90	1.65	1.07	0.61	0.66	0.73	0.30	0.38	1.32	2.25
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	4.06	3.83	5.45	3.21	2.15	1.35	1.43	1.54	0.78	0.92	2.62	4.28

**Cuadro 9. Volúmenes de remoción diaria promedio de agua subterránea (WUSHAL), m<sup>3</sup>día<sup>-1</sup>.**

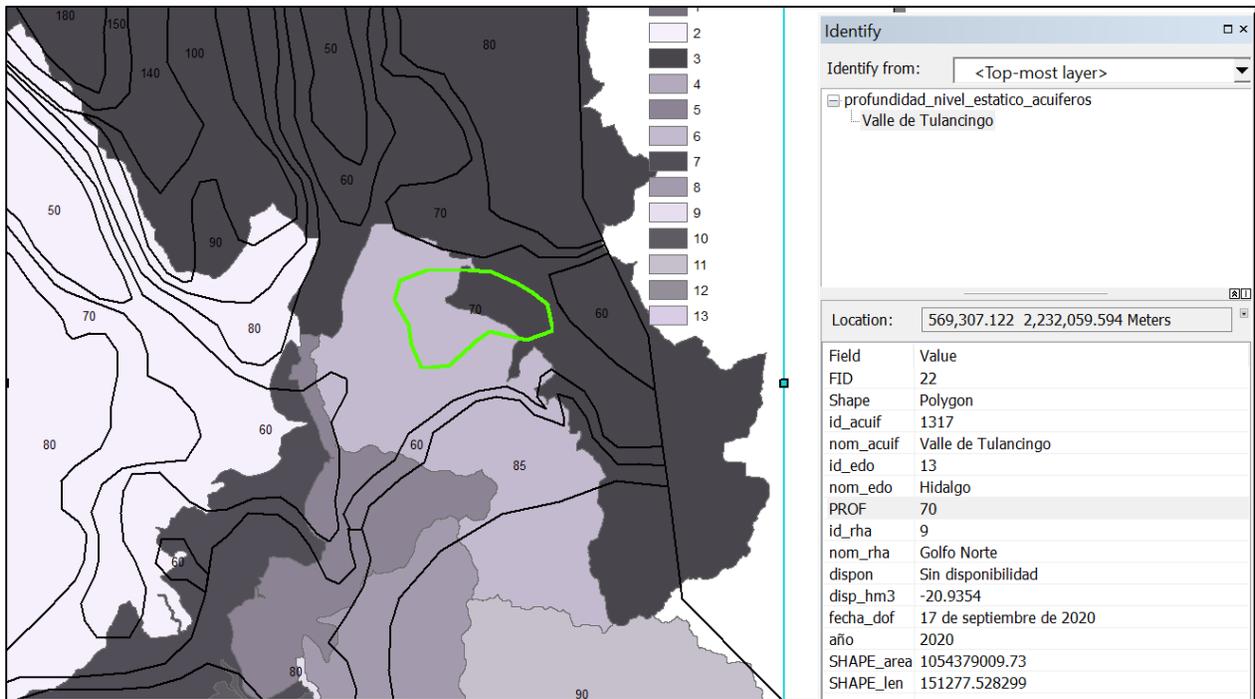
SUBCUENCA	Volúmenes mensuales (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> día <sup>-1</sup> )											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0.14	0.14	0.18	0.12	0.09	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.10	0.15
2	4.38	4.11	5.93	3.42	2.26	1.35	1.44	1.57	0.72	0.87	2.77	4.63
3	4.95	4.65	6.70	3.87	2.56	1.54	1.64	1.79	0.83	1.00	3.14	5.23
4	0.15	0.16	0.17	0.14	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.13	0.15
5	3.20	3.05	4.25	2.57	1.78	1.18	1.23	1.32	0.75	0.85	2.13	3.37
6	1.64	1.55	2.19	1.30	0.89	0.57	0.60	0.64	0.34	0.40	1.07	1.73
7	1.88	1.77	2.54	1.47	0.97	0.59	0.63	0.68	0.32	0.38	1.19	1.99
8	0.53	0.54	0.62	0.48	0.40	0.36	0.36	0.37	0.33	0.33	0.44	0.54
9	0.11	0.11	0.16	0.09	0.06	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.07	0.12
10	0.44	0.42	0.59	0.35	0.24	0.15	0.16	0.17	0.09	0.10	0.29	0.47
11	0.34	0.32	0.44	0.27	0.19	0.13	0.14	0.15	0.09	0.10	0.23	0.35
12	0.09	0.09	0.10	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.08	0.09
13	0.48	0.46	0.62	0.40	0.29	0.21	0.22	0.23	0.16	0.17	0.34	0.50

### 5.2.6 Profundidad del nivel freático

En la zona de estudio se ubicaron los acuíferos Metztlán, Huasca- Zoquital y Valle de Tulancingo, que abarcan más del 90 % de la superficie de la cuenca (Figura 18). Se digitalizaron las curvas de igual profundidad del nivel estático con base en los mapas publicados en la “Actualización de disponibilidad media anual del agua en el acuífero Metztlán (1314), estado de Hidalgo” (CONAGUA, 2020), la “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huasca-Zoquital (1315), Estado de Hidalgo” (DOF, 2015) y la “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tulancingo (1317), Estado de Hidalgo” (CONAGUA, 2020b). Con estas curvas se estimó la profundidad media del acuífero para cada subcuenca delimitada, mismas que fueron introducidas al modelo (Figura 19). La proporción de superficie que abarcan los acuíferos dentro de la cuenca Venados es: 1317 Valle de Tulancingo 60 %, 1315 Huasca-Zoquital 25 % y 1314 Metztlán 15 %, los tres del tipo libre y con disponibilidad de - 20.93, 9.5 y 9.9 hm<sup>3</sup>, respectivamente.



**Figura 18. Límites geográficos de acuíferos dominantes en la zona de estudio.**



**Figura 19. Curvas de igual profundidad del nivel estático identificadas por subcuenca.**

### **5.2.7 Métodos de cálculo seleccionados en el modelo**

El método que se eligió para el cálculo de evapotranspiración fue Penman-Monteith, y para el escurrimiento superficial el de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA). En el caso del flujo lateral, el modelo de almacenamiento cinemático para flujo subterráneo fue el utilizado por el programa. Para el cálculo del agua subterránea, SWAT simuló dos acuíferos en cada subcuenca, el acuífero poco profundo es un acuífero no confinado; el agua que ingresa al acuífero profundo se asume que contribuye al flujo de la corriente en algún lugar fuera de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2009).

### **5.3 Balance Hidrológico**

El balance hidrológico de la cuenca se realizó con ayuda del modelo SWAT©, el cual incluyó desde el nacimiento del Río Tulancingo en los límites del estado de Puebla con el estado de Hidalgo, hasta el sitio donde se ubica la estación hidrométrica Venados, con clave 26042 y coordenadas 20° 28'02.38" N 98°40'15.52" O; donde el cauce principal se conoce ya con el nombre de río Metztlán. Lo anterior, a pesar de representar una superficie mucho mayor a la que corresponde a la cuenca en estudio (Río Tulancingo), se realizó a fin de contrastar los resultados del modelo con la información hidrométrica para su calibración y validación. En lo sucesivo, la cuenca con salida en la estación hidrométrica referida se le denominará "Cuenca Venados" y la cuenca con salida aguas arriba, sobre las coordenadas 20°10'36.30"N y 98°22'28.19"O será identificada como "Cuenca Tulancingo".

El análisis que se desarrolló fue tanto para la Cuenca Venados como para la Cuenca Tulancingo, con el objeto de brindar un panorama general de los resultados obtenidos en el modelo SWAT.

Las variables de salida del modelo, así como la unidad en que se expresan, obtenidas para cada subcuenca, se encuentran descritas en el Cuadro 10.

**Cuadro 10. Descripción de las variables de salida obtenidas en el modelo SWAT.**

<b>VARIABLE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>PREC</b>	PRECIPITACIÓN TOTAL, MEDIA MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>PET</b>	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, MEDIA MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>ET</b>	EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL, MEDIA MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>SW</b>	CANTIDAD DE AGUA ALMACENADA EN PERFIL DE SUELO, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>PERC</b>	AGUA PERCOLADA MÁS ALLÁ DEL FONDO DEL PERFIL DEL SUELO, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>SURQ</b>	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>GWQ</b>	CONTRIBUCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA A LA CORRIENTE, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>LATQ</b>	CONTRIBUCIÓN DEL FLUJO LATERAL A LA CORRIENTE, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm)
<b>WYLD</b>	PRODUCCIÓN DE AGUA. CANTIDAD TOTAL DE AGUA QUE SALE DE LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (HRU) E INGRESA A LA CORRIENTE PRINCIPAL, MENSUAL POR SUBCUENCA (mm) $WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS^1 - pond\ abstractions^2$

<sup>1</sup> infiltración en el fondo de la corriente. <sup>2</sup> almacenamiento en depresiones.

### 5.3.1 Primer Balance, SW1.

En el primer balance por subcuenca se utilizó la ecuación de la fase terrestre del ciclo hidrológico, expuesta previamente en el presente documento como Ecuación (2), dentro del apartado 5.3 que, adaptada a las variables de salida del modelo, queda de la siguiente forma:

$$SW1_{mi} = SW_{mi} + \sum (PREC_{mi} - SURQ_{mi} - ET_{mi} - PERC_{mi} - GW_{mi}) \quad (3)$$

Dónde

$SW1_{mi}$ , es la disponibilidad de agua final en el suelo No. 1, valor medio del mes i (mm).

$SW_{mi}$ , es el contenido inicial de agua en el suelo, valor medio mensual (mm).

$PREC_{mi}$ , es la cantidad de precipitación, valor medio mensual (mm).

$SURQ_{mi}$ , es la cantidad de escurrimiento superficial, valor medio mensual (mm).

$ET_{mi}$ , es la cantidad de evapotranspiración, valor medio mensual (mm H<sub>2</sub>O).

$PERC_{mi}$ , es la cantidad de agua se infiltra en el perfil del suelo, valor medio mensual (mm H<sub>2</sub>O).

$GW_{mi}$  es el flujo de agua subterránea o flujo base que ingresa a la corriente principal, valor medio mensual (mm).

### 5.3.2 Segundo Balance, SW2.

De forma adicional, dado que el enfoque del estudio se encuentra orientado a la parte superficial, ante la carencia de elementos suficientes para un análisis más detallado de la parte subterránea, se incluye un “segundo balance” como propuesta, en la que se supone un valor nulo para el contenido inicial de agua en el suelo ( $SW_{mi} = 0$ ). Lo anterior, ante un escenario de disponibilidad inicial 0 del agua subterránea presente en el suelo, dado el decreto de veda establecido para el 87% de la superficie de la cuenca en estudio (DOF, 2020). Quedando una segunda propuesta para la estimación de disponibilidad de la siguiente forma:

$$SW2_{mi} = SW1_{mi} - SW_{mi} = \sum (PREC_{mi} - SURQ_{mi} - ET_{mi} - PERC_{mi} - GW_{mi}) \quad (4)$$

En la ecuación (4), los elementos corresponden a las mismas variables de la ecuación (3), a diferencia únicamente de  $SW2_{mes}$ , que en este caso representa un escenario de **disponibilidad de agua final en el suelo No. 2**, valor medio mensual en mm.

### 5.3.3 Análisis de tres subperiodos de tiempo

Para comprender mejor el comportamiento y variabilidad de los elementos que constituyen el balance hídrico en la zona de estudio y dada la amplitud del tiempo en el modelo (36 años), se subdividieron los resultados en 3 subperiodos de 12 años cada uno: 1)1982-1993, 2)1994-2005 y 3)2006-2017. La comparación de su comportamiento a nivel de valores medios mensuales se realizó mediante el Modelo Aditivo Generalizado (GAM por sus siglas en inglés). Este es un modelo de regresión suavizado, no paramétrico, que es considerado una ampliación de los Modelos Lineales Generalizados (GLM) (Dubos *et al.*, 2022; Pérez *et al.*, 2021), eligiendo la familia gaussiana para la variable respuesta. Las gráficas y parámetros estadísticos se obtuvieron con ayuda de las librerías ggplot2 y mgcv, dentro del software RStudio® (R Core Team, 2022).

El modelo GAM se aplicó a cada conjunto de valores medios mensuales de las variables: PREC, SURQ, ET, PERC, GW, SW y SW1; así como a la evapotranspiración potencial (PET) y la producción de agua (WYLD), por periodo de tiempo.

## 5.4 Calibración y validación

Previo a la calibración y validación del modelo SWAT, se realizó un análisis de sensibilidad mediante el *software* SWATCUP. En dicho programa, se seleccionó el algoritmo de Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2), que se basa en una estructura bayesiana (Guedes *et al.*, 2018; Abbaspour, 2015), y que ofrece estimaciones satisfactorias (Achamyeleh *et al.*, 2019). El indicador de rendimiento del modelo SUFI-2 elegido fue Nash Sutcliffe (NS), mismo que sirvió como función objetivo en el proceso de calibración y validación.

Los parámetros obtenidos en el mejor ajuste se incorporaron al modelo de simulación. El resultado de escurrimiento medio mensual en la cuenca de salida (subcuenca 1), al ser contrastados con los

registrados en la estación hidrométrica Venados para el mismo periodo de tiempo (1982-2002), fueron la base de la calibración. Las medidas de bondad de ajuste final fueron: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de Nash-Sutcliff (NS); en ambos, si resultan ser igual a la unidad, indica que los valores en la simulación se ajustan exactamente a los observados en la realidad (Qiao *et al.*, 2015).

Para la validación, se tomaron los valores de escurrimiento medio mensual del periodo comprendido del año 2003 al año 2013 (11 años); mediante la determinación de las mismas medidas de bondad de ajuste que para la calibración ( $R^2$  y NS).

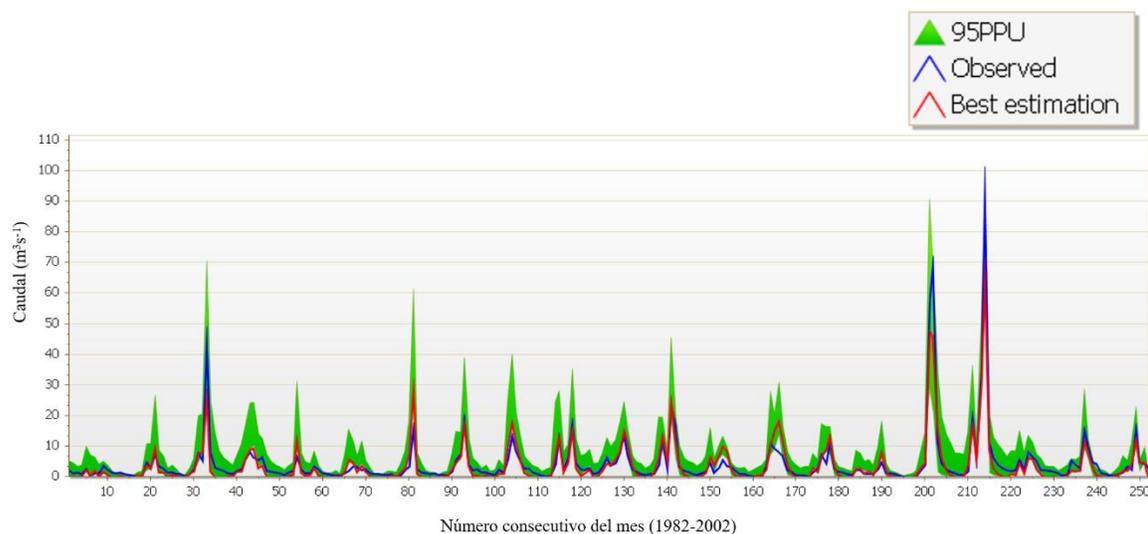
## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Calibración y validación

El análisis de sensibilidad comprendió la modificación de los parámetros descritos en el 0, siendo en la simulación número 474 (mediante un proceso de 2000 simulaciones), en la que se encontraron los valores de mejor ajuste estadístico (columna final del 0). Estos valores fueron incorporados a la simulación final, mediante el método de cambio indicado para cada uno. En la Figura 20, el área en color verde representa el 95% de incertidumbre en la predicción (95PPU), la línea en color azul son los valores de escurrimiento medio mensual observados en la estación hidrométrica Venados para el periodo de análisis (1982-2002) y la línea en color rojo representa los valores obtenidos en la mejor estimación (con los parámetros ajustados). Si se comparan los hidrogramas en dicha figura, destacan tres periodos en los que el modelo subestimó el caudal durante el periodo de calibración, ocurridos en: septiembre de 1984, octubre de 1998 y octubre de 1999, cuyo orden progresivo en la gráfica corresponde a los números: 33, 202 y 214, respectivamente.

**Cuadro 11. Descripción, método de cambio, intervalos de ajuste inicial y valores ajustados para los parámetros seleccionados.**

Número	Parámetro	Descripción	Método de cambio	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ajustado
1	CN2	Número de curva, condición de humedad 2.	Relativo	-0.20	0.20	-0.1855
2	ALPHA_B F	Constante de recesión del flujo base.	Reemplazo	0.00	1.00	0.6787
3	GW_DELA Y	Tiempo de retraso del agua subterránea	Reemplazo	30.00	566.00	41.3899
4	GWQMN	Profundidad del agua en el acuífero somero, requerida para el caudal de retorno.	Reemplazo	500.00	3536.00	2978.1350
5	OV_N	Valor "n" de Manning para el escurrimiento superficial.	Relativo	-0.20	0.20	-0.0331
6	SHALLST	Profundidad inicial en el acuífero somero	Reemplazo	500.00	10000.00	1181.25



\*95PPU. - 95% de incertidumbre en la predicción.

**Figura 20. Comparación de valores de escurrimiento medio mensual, medidos y estimados para el periodo de calibración (1982-2002).**

En el Cuadro 12 se presentan el análisis de sensibilidad de los parámetros de ajuste al modelo final, producto de un análisis de regresión múltiple. Que, de acuerdo con Abbaspour (2015), al comparar el valor absoluto de t-Stat (coeficiente del parámetro dividido por su error estándar) con el Valor-P de la tabla de distribución t de Student, cuanto mayor sea el primero y menor el segundo, más sensible será el parámetro. En otras palabras, para un Valor-P < 0.05, como es el caso de los parámetros CN2, SHALLST, GW\_DELAY y GWQMN, se puede asegurar con un 95% de probabilidad que estas variables tienen un efecto significativo en los resultados de la variable modelada.

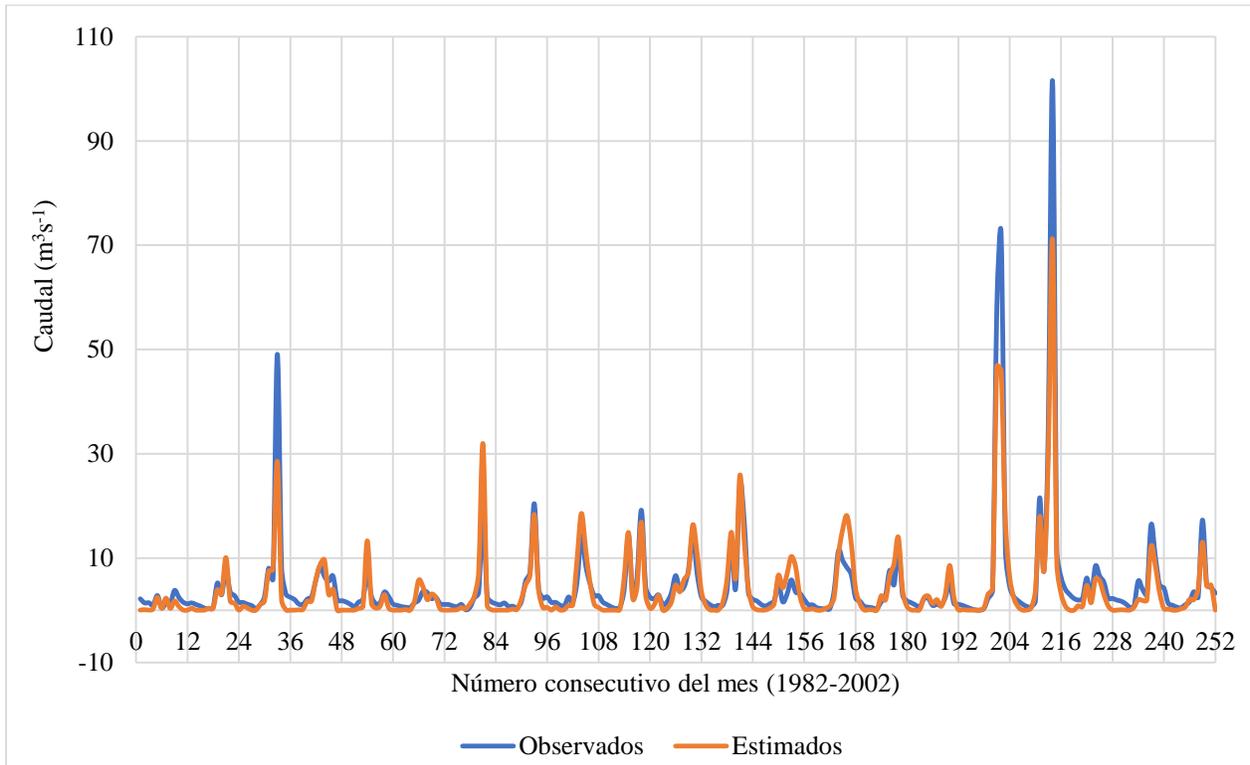
**Cuadro 12. Análisis de sensibilidad de los parámetros seleccionados.**

<b>Número</b>	<b>Parámetro</b>	<b>t- Stat</b>	<b>Valor-P</b>
1	CN2	-44.38	9.49 E-30
6	SHALLST	-5.03	5.41 E-7
3	GW_DELAY	3.32	9.06 E -4
4	GWQMN	2.01	4.49 E-2
2	ALPHA_BF	-1.67	9.57 E-2
5	OV_N	1.08	2.80 E-1

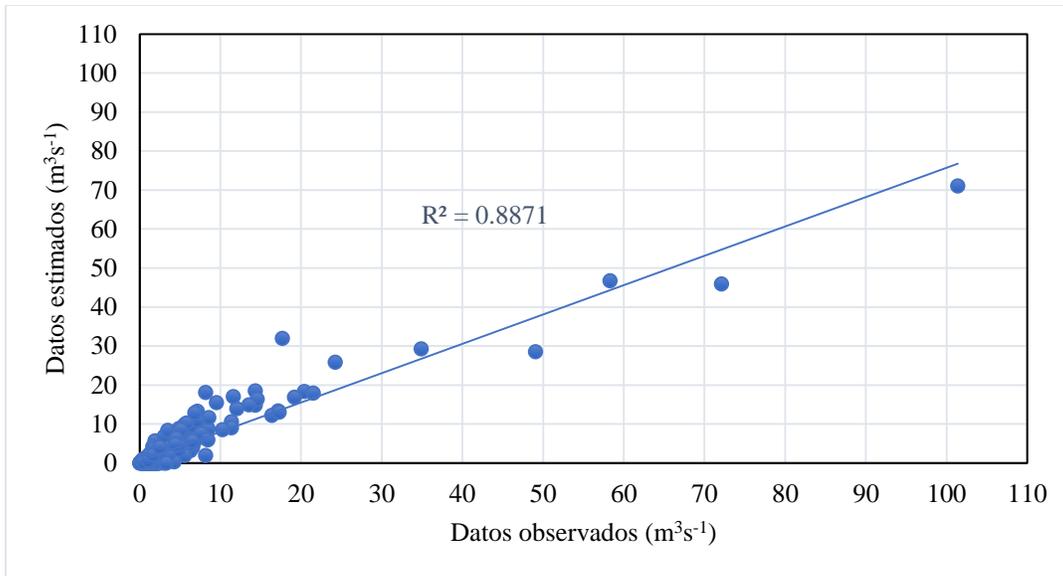
Una vez identificados los parámetros de mejor ajuste en la calibración, sus valores se incorporaron al modelo en SWAT, para una simulación que proporcionó los resultados finales.

El contraste del escurrimiento medio mensual registrado en la estación hidrométrica Venados correspondientes a un periodo de 21 años (de 1982 a 2002), con sus homólogos obtenidos con un modelo calibrado, se muestran en la Figura 21. Se aprecia que el modelo estimó adecuadamente el flujo, presenta la misma tendencia que los datos medidos en el periodo de calibración con excepción en los picos de escurrimiento, en los que el modelo subestimó el flujo.

En la Figura 22 se muestra el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) como un indicador de bondad de ajuste del modelo propuesto, en donde el modelo explica el 88% de la varianza total de los datos observados.



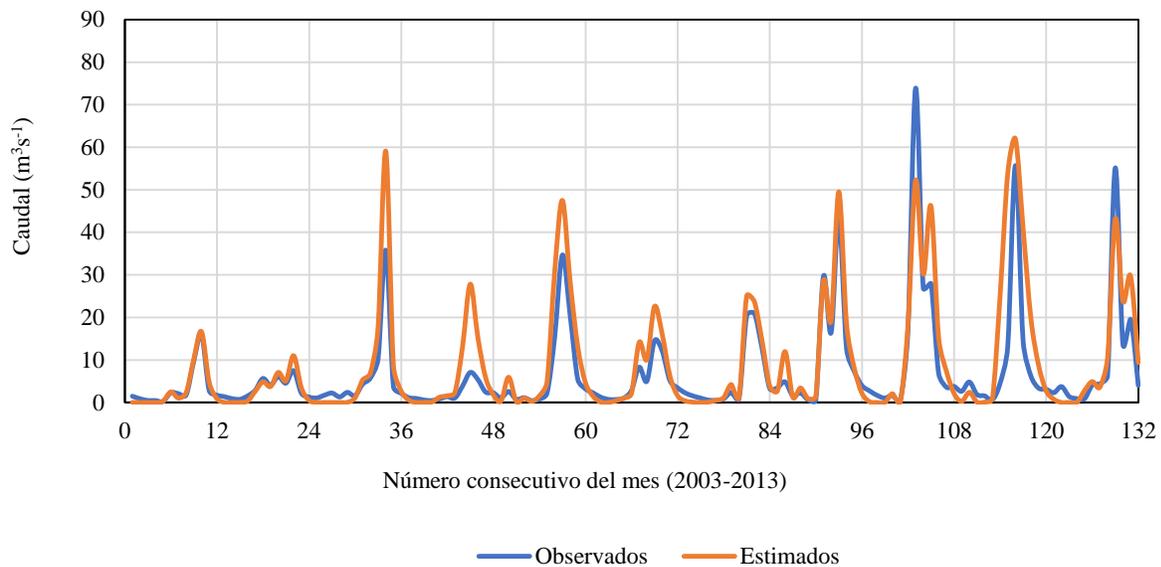
**Figura 21. Hidrograma del periodo de calibración 1982-2002, caudales mensuales observados y estimados con SWAT.**



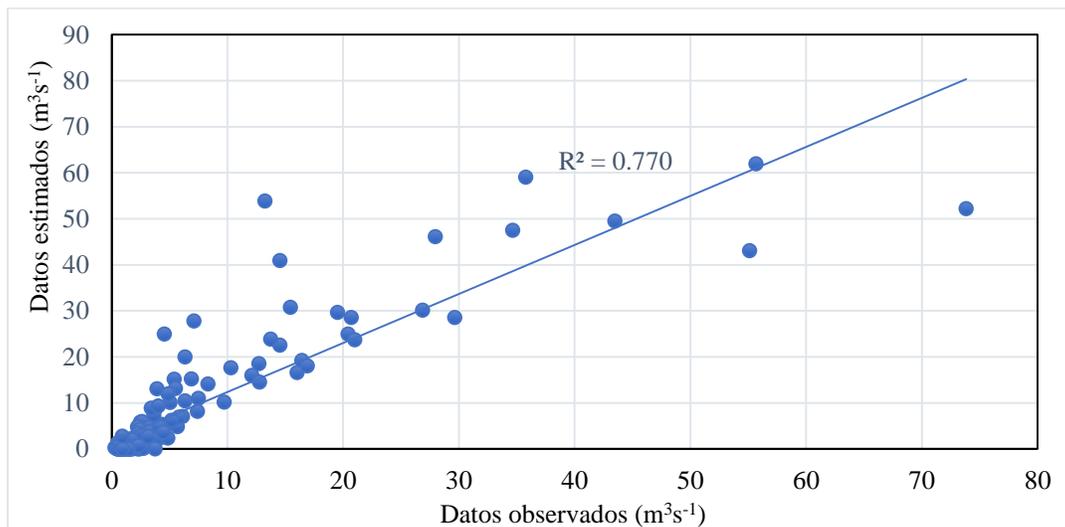
**Figura 22. Diagrama de dispersión de valores de caudal observado en la estación hidrométrica Venados vs caudal estimados en el modelo SWAT, periodo de calibración 1982-2002.**

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice de Nash-Sutcliffe, fueron de 0.887 y 0.861, respectivamente. El Error Cuadrático Medio (RMSE) fue de  $3.62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . [R1]

En la validación del modelo se emplearon un total de 132 datos de escurrimiento medio mensual, registrados también en la estación hidrométrica Venados, para un periodo de 11 años (de 2003 a 2013), al comparar con sus homólogos obtenidos del modelo SWAT calibrado, su gráfica se presenta en la Figura 23 y su ajuste estadístico en la Figura 24.



**Figura 23. Hidrograma del periodo de validación (2003-2013), caudales mensuales observados y estimados con SWAT.**



**Figura 24. Diagrama de dispersión de valores de caudal observado en la estación hidrométrica Venados vs valores de caudal estimado con el modelo SWAT, periodo de validación 2003-2013.**

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice de Nash-Sutcliffe, en la validación fueron de 0.770, y 0.620, respectivamente. El Error Cuadrático Medio (RMSE) fue de  $6.71 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . [R2]

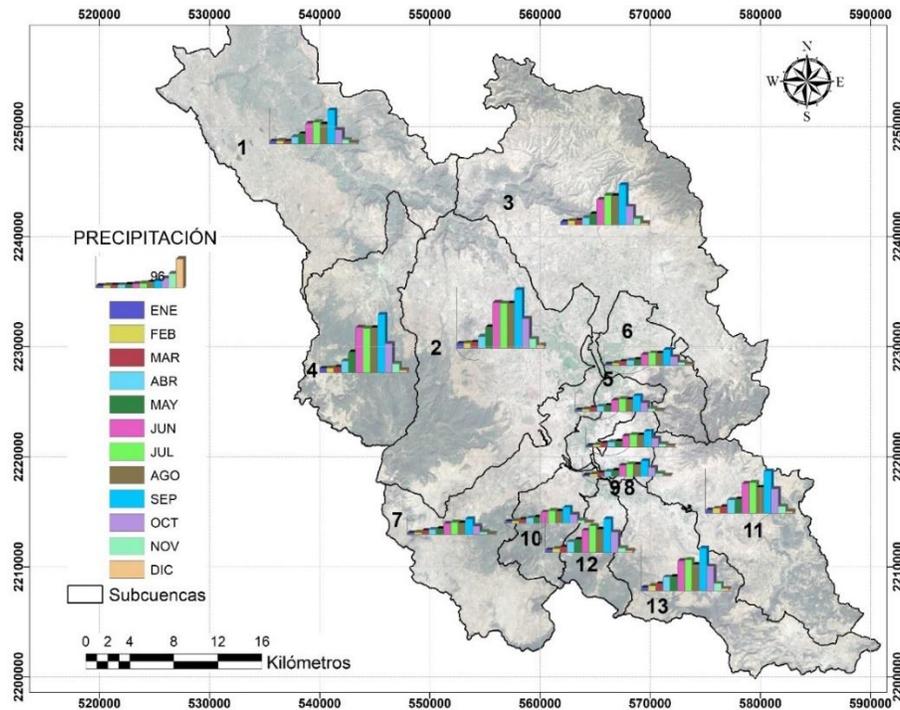
Finalmente, se considera que el comportamiento global del modelo fue adecuado, ya que los indicadores: coeficiente de determinación ( $R^2$ ) e índice de Nash-Sutcliffe (NS), tanto la calibración ( $R^2= 0.89$  y  $NS=0.86$ ) como la validación ( $R^2= 0.77$  y  $NS=0.62$ ), resultaron favorables (Molnar, 2011). Se identificaron parámetros de calibración y validación más altos que los obtenidos por Mengistu et al. (2019) en zonas áridas y semi áridas de África del Sur, los cuales alcanzaron una  $R^2$  y  $NS > 0.71$ , para ambos periodos. Estos últimos alcanzaron intervalos aceptables, lo cual reafirma que el presente estudio posee un alto grado de confianza, a pesar de las subestimaciones identificadas tanto en la calibración como en la validación.

## **6.2 Cuenca Venados**

A fin de dar un panorama general de la cuenca Venados, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para precipitación, evapotranspiración y caudal medio mensual de escurrimiento en corrientes.

### **6.2.1 Precipitación**

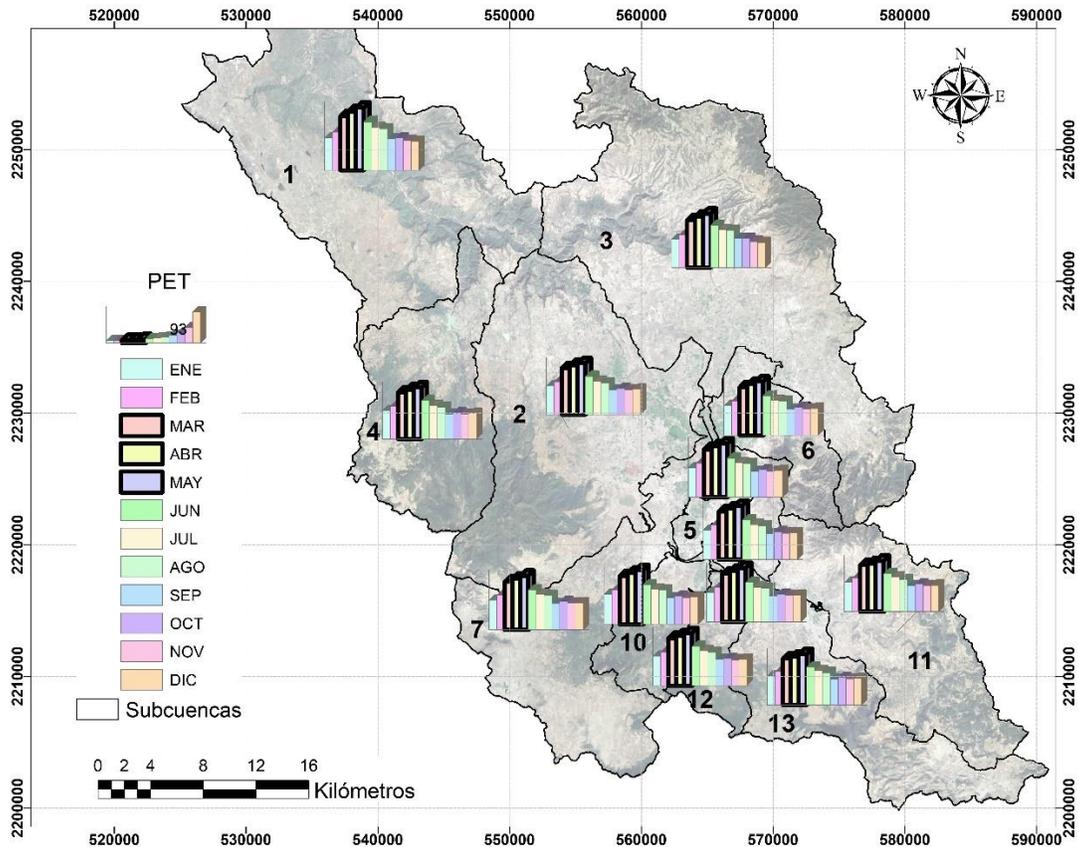
La distribución de la precipitación media mensual en la cuenca Venados se comportó de manera similar en todas sus subcuencas, donde se identificó mayor lámina de agua en el periodo de mayo a octubre, y un periodo más seco de noviembre a abril. El máximo se observó en septiembre (ver Figura 25), lo cual es una condición similar a la identificada por Mendoza *et al.* (2018), con una asociación de la entrada de humedad hacia la región por el lado del Pacífico, donde la mayor frecuencia de los ciclones tropicales se origina en septiembre. Las subcuencas 5 a la 10 presentaron valores de precipitación menores en proporción que, al ser comparadas con los polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas, su comportamiento se asoció con los registros de la estación establecida en esa zona.



**Figura 25. Distribución de la precipitación media mensual en la Cuenca Venados.**

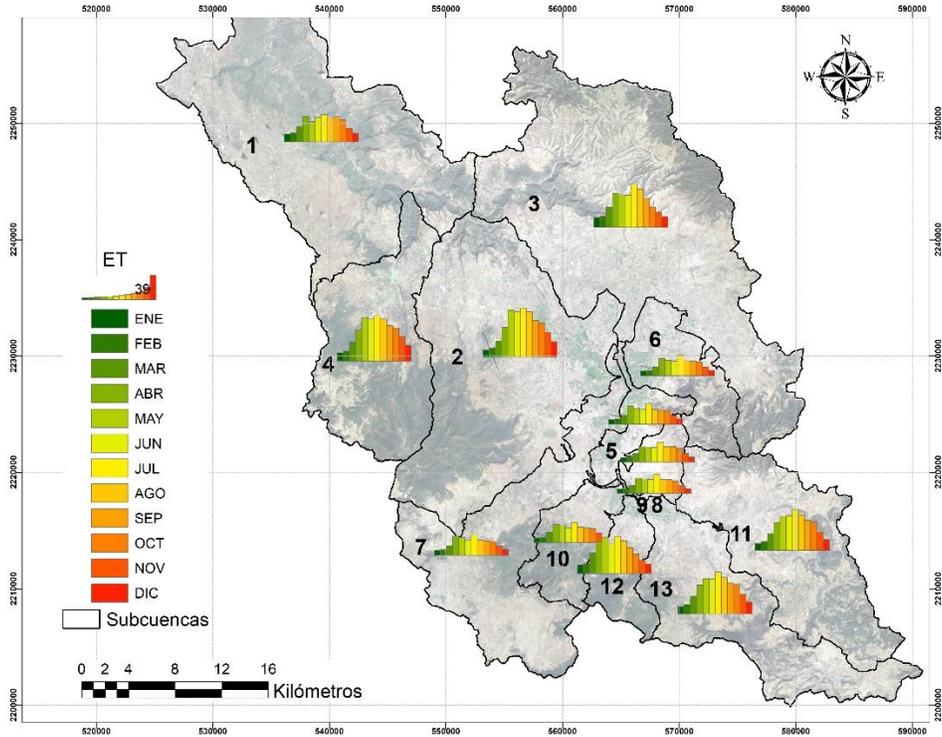
### 6.2.2 Evapotranspiración potencial (PET) y evapotranspiración actual (ET)

Monterroso y Gómez (2021), en su estudio sobre impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial en México mencionan que para poder satisfacer de agua en la etapa de germinación y crecimiento de los cultivos, la lluvia debe ser igual o mayor a la mitad de la evapotranspiración potencial (PET). Dado lo anterior, si bien en la cuenca Venados el incremento en el periodo lluvioso es intenso de junio a octubre, al realizar el comparativo de precipitación vs evapotranspiración potencial, la condición sugerida por dichos autores se cumple sólo de junio a octubre en las subcuencas 2, 4 y en septiembre para las cuencas 1, 3, 11, 12 y 13. La mayor demanda de evapotranspiración se observó dentro de todas las subcuencas de marzo a mayo (ver Figura 26).



**Figura 26. Distribución de la evapotranspiración potencial en la Cuenca Venados.**

En la Figura 27, se aprecia la distribución media mensual de la evapotranspiración actual. Dado que, para obtenerla, el modelo SWAT toma la evapotranspiración potencial calculada y la “ajusta”, restando primero la lluvia interceptada calculada (asumiendo que ésta se evapora), y posteriormente, calculando la cantidad máxima de transpiración y evaporación de sublimación/tierra (Neitsch *et al.*, 2005). Los valores de evapotranspiración actual resultaron menores que la evapotranspiración potencial. Los máximos en las subcuencas del valle (de la subcuenca 5 a la subcuenca 9) se aprecia que disminuyen debido a que es una región donde se encuentra concentrada la zona urbana y resulta lógico que sea menor su demanda por evapotranspiración, ya que posee menor vegetación que en las cuencas altas.



**Figura 27. Distribución de la evapotranspiración actual (ET) por subcuenca.**

### 6.2.3 Caudal medio mensual en corrientes por subcuenca

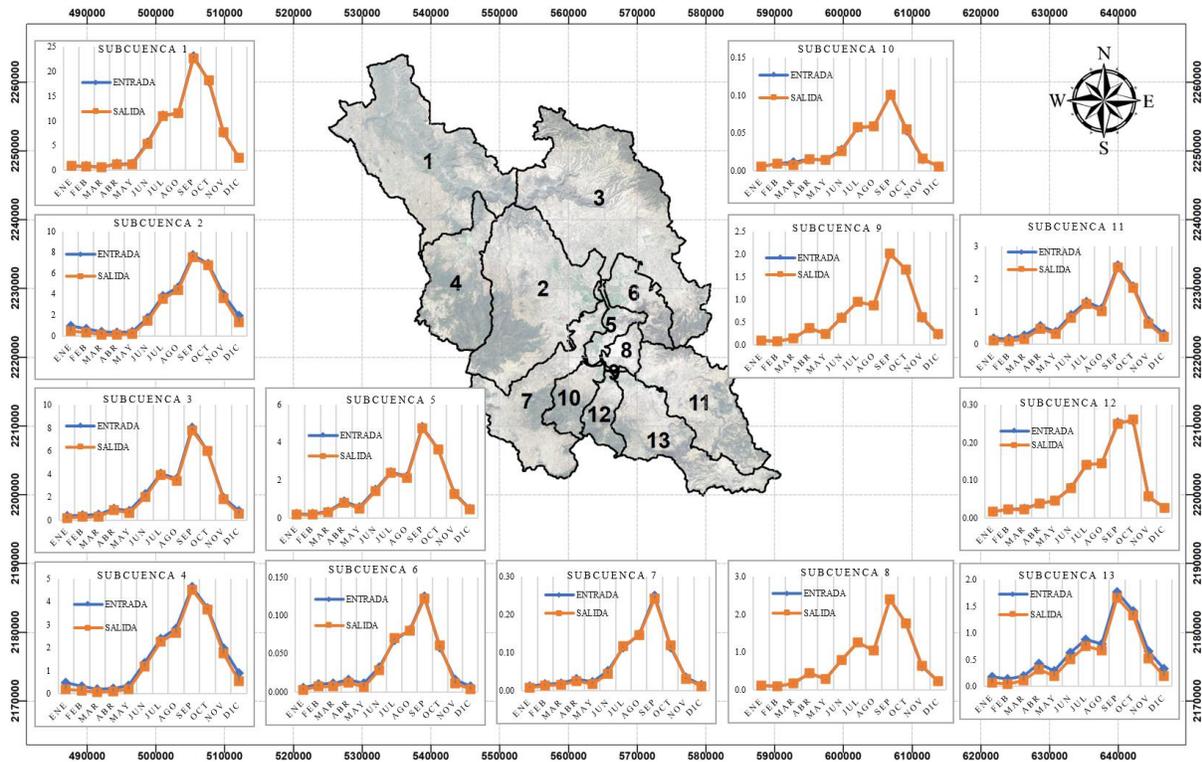
Los hidrogramas de entrada y salida de cada subcuenca reflejan el efecto de la temporada de lluvias sobre el escurrimiento. El periodo de máxima precipitación coincide con la de máximo escurrimiento a la salida durante septiembre y octubre. Los valores de escurrimiento mínimo se presentaron durante enero y febrero, tal como se observa en el Cuadro 1, y el 0. En la Figura 28 se muestran los hidrogramas de entrada y salida para cada subcuenca.

**Cuadro 13. Caudal medio mensual de entrada ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ), obtenido para cada subcuenca en SWAT.**

MES	CAUDAL MEDIO MENSUAL ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )												
	SUBCUENCA												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>ENE</b>	0.955	0.965	0.364	0.469	0.223	0.006	0.013	0.108	0.100	0.005	0.195	0.016	0.185
<b>FEB</b>	0.919	0.659	0.445	0.335	0.200	0.011	0.018	0.098	0.075	0.009	0.188	0.023	0.142
<b>MAR</b>	0.659	0.388	0.485	0.212	0.336	0.011	0.021	0.169	0.142	0.012	0.265	0.023	0.201
<b>ABR</b>	1.356	0.338	1.007	0.242	0.860	0.016	0.031	0.455	0.366	0.015	0.567	0.038	0.423
<b>MAY</b>	1.371	0.398	0.789	0.360	0.559	0.011	0.024	0.286	0.249	0.014	0.397	0.045	0.294
<b>JUN</b>	5.667	1.749	2.245	1.334	1.477	0.032	0.052	0.799	0.613	0.027	0.903	0.081	0.631
<b>JUL</b>	11.076	3.843	4.037	2.398	2.423	0.068	0.114	1.254	0.955	0.057	1.305	0.140	0.878
<b>AGO</b>	11.622	4.684	3.596	2.820	2.178	0.081	0.148	1.046	0.877	0.059	1.091	0.145	0.796
<b>SEP</b>	<b>23.040</b>	<b>7.754</b>	<b>8.078</b>	<b>4.629</b>	<b>4.818</b>	<b>0.124</b>	<b>0.250</b>	<b>2.406</b>	<b>2.013</b>	<b>0.101</b>	<b>2.411</b>	<b>0.253</b>	<b>1.763</b>
<b>OCT</b>	17.942	6.881	5.996	3.728	3.621	0.058	0.114	1.755	1.650	0.053	1.766	0.258	1.415
<b>NOV</b>	7.562	3.986	1.973	1.976	1.291	0.016	0.035	0.630	0.601	0.015	0.718	0.055	0.665
<b>DIC</b>	2.518	1.902	0.772	0.898	0.487	0.007	0.016	0.232	0.232	0.005	0.320	0.025	0.330

**Cuadro 14. Caudal medio mensual de salida obtenido para cada subcuenca en SWAT.**

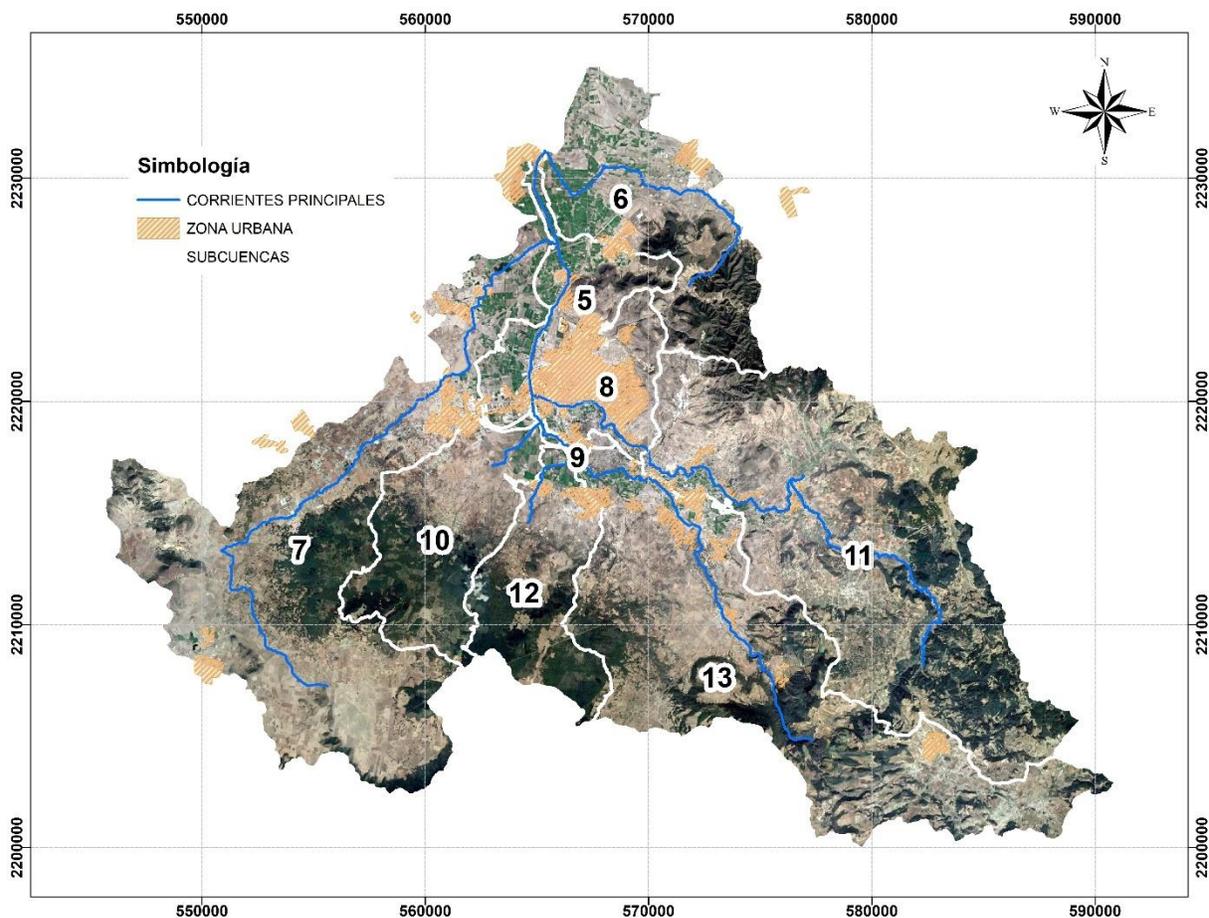
MES	CAUDAL MEDIO MENSUAL (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )												
	SUBCUENCA												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>ENE</b>	0.873	0.460	0.178	0.189	0.183	0.003	0.009	0.109	0.101	0.005	0.112	0.016	0.079
<b>FEB</b>	0.854	0.284	0.293	0.127	0.161	0.007	0.014	0.099	0.076	0.009	0.106	0.023	0.042
<b>MAR</b>	0.571	0.125	0.324	0.062	0.295	0.007	0.015	0.169	0.140	0.008	0.170	0.023	0.111
<b>ABR</b>	1.274	0.124	0.845	0.102	0.805	0.012	0.025	0.453	0.364	0.015	0.474	0.037	0.312
<b>MAY</b>	1.286	0.152	0.640	0.209	0.504	0.006	0.017	0.283	0.247	0.014	0.314	0.045	0.189
<b>JUN</b>	5.358	1.459	2.015	1.169	1.399	0.029	0.045	0.787	0.603	0.026	0.816	0.079	0.507
<b>JUL</b>	11.019	3.575	3.909	2.258	2.384	0.070	0.118	1.254	0.955	0.058	1.234	0.140	0.755
<b>AGO</b>	11.500	4.381	3.436	2.646	2.119	0.080	0.147	1.042	0.874	0.059	1.018	0.145	0.670
<b>SEP</b>	<b>22.654</b>	<b>7.507</b>	<b>7.827</b>	<b>4.513</b>	<b>4.760</b>	<b>0.121</b>	<b>0.243</b>	<b>2.396</b>	<b>2.003</b>	<b>0.100</b>	<b>2.352</b>	<b>0.250</b>	<b>1.659</b>
<b>OCT</b>	18.163	6.782	6.026	3.662	3.610	0.061	0.120	1.760	1.656	0.055	1.736	0.261	1.332
<b>NOV</b>	7.688	3.613	1.811	1.765	1.252	0.012	0.030	0.636	0.607	0.016	0.630	0.057	0.526
<b>DIC</b>	2.497	1.282	0.549	0.557	0.446	0.004	0.011	0.234	0.235	0.005	0.232	0.026	0.200



**Figura 28. Hidrogramas de entrada y salida por subcuenca.**

### 6.3 Cuenca del Río Tulancingo

La cuenca del Río Tulancingo abarca nueve de las 13 subcuencas delimitadas hasta la estación hidrométrica Venados, en lo sucesivo el análisis se enfocará en ellas, y se identifican con numeración de la subcuenca 5 a la subcuenca 13; con punto de salida en las coordenadas 20°10'38.6" N y 98°22'28.36" O (subcuenca 5), como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29. Distribución de las subcuencas que conforman la cuenca del Río Tulancingo.**

### 6.3.1 Elementos del balance por subcuenca

En el Cuadro 1 se presentan los valores medios mensuales de cada elemento del balance por subcuenca y se observa que la evapotranspiración potencial supera por mucho la lámina de precipitación la mayor parte del año, a excepción de septiembre. Esta condición se modifica al compararse con la evapotranspiración actual, en donde los requerimientos son cubiertos de manera satisfactoria de junio a octubre; situación que no representaría mayor problema si el uso de suelo y vegetación, que es en un 64 % dominado por la agricultura de temporal y riego, tuviera establecidos únicamente cultivos anuales. Sin embargo, al ser ganadería bovina con fines de

producción de leche una de las actividades principales (Ruíz *et. al.*, 2021), es común observar forrajes de ciclo perenne, los cuales demandan agua a lo largo de todo el año. Dentro de los elementos del mismo Cuadro 1, el contenido de agua inicial en el suelo es también de gran importancia ya que, como se puede observar, su proporción es en promedio un 40 % del total de los elementos.

**Cuadro 15. Valores medios mensuales por subcuenca (mm).**

SUBCUENCA	MES	PREC	PET	ET	SW	PERC	SURQ	GW	LATQ	WYLD
5	ENE	4.89	87.94	7.92	30.29	0.04	0.02	8.3E-05	0.06	0.20
	FEB	7.78	101.93	8.83	28.96	0.10	0.08	2.8E-05	0.12	0.28
	MAR	12.88	142.71	14.46	26.33	0.75	0.09	8.3E-05	0.18	0.34
	ABR	17.10	151.78	29.36	13.24	0.38	0.21	1.4E-04	0.24	0.51
	MAY	19.60	159.72	25.41	7.01	0.06	0.12	1.1E-04	0.24	0.41
	JUN	36.45	117.13	23.26	18.59	0.42	0.52	1.7E-04	0.46	1.02
	JUL	40.93	103.70	32.97	21.84	2.90	0.98	4.7E-04	1.01	2.02
	AGO	39.45	100.36	23.93	31.89	2.80	1.83	5.0E-04	0.83	2.71
	SEP	51.92	77.13	22.83	47.04	9.64	2.69	7.2E-04	1.43	4.20
	OCT	28.68	82.78	21.70	47.65	4.77	0.90	8.9E-04	0.92	1.96
	NOV	9.74	78.06	14.46	41.80	0.86	0.08	6.4E-04	0.23	0.47
	DIC	3.34	79.67	8.91	36.15	0.02	0.02	3.6E-04	0.04	0.22
6	ENE	4.89	87.95	7.45	26.47	0.04	0.01	0.01	0.08	0.23
	FEB	7.78	101.94	8.39	25.43	0.17	0.03	0.01	0.24	0.37
	MAR	12.88	142.70	13.91	23.21	0.81	0.03	0.01	0.31	0.43
	ABR	17.10	151.79	27.46	11.86	0.47	0.12	0.01	0.40	0.60
	MAY	19.60	159.79	24.59	6.43	0.07	0.03	0.02	0.34	0.45
	JUN	36.45	117.26	23.08	17.53	0.79	0.36	0.02	0.79	1.21
	JUL	40.93	103.85	32.56	19.91	3.74	0.65	0.05	1.89	2.63
	AGO	39.45	100.51	23.99	28.85	3.45	1.60	0.05	1.44	3.15
	SEP	51.92	77.24	23.29	42.41	10.35	2.23	0.06	2.31	4.69
	OCT	28.68	82.88	21.79	42.46	5.01	0.63	0.06	1.42	2.27
	NOV	9.74	78.12	14.29	36.73	0.88	0.04	0.04	0.34	0.60
	DIC	3.34	79.69	8.47	31.50	0.03	0.01	0.02	0.08	0.28
7	ENE	4.89	88.25	7.72	35.10	0.02	0.00	0.01	0.08	0.19
	FEB	7.78	102.16	8.62	34.12	0.08	0.01	0.00	0.15	0.24

<b>SUBCUENCA</b>	<b>MES</b>	<b>PREC</b>	<b>PET</b>	<b>ET</b>	<b>SW</b>	<b>PERC</b>	<b>SURQ</b>	<b>GW</b>	<b>LATQ</b>	<b>WYLD</b>	
	MAR	12.88	142.84	14.92	31.23	0.69	0.00	0.01	0.23	0.31	
	ABR	17.10	151.93	30.31	17.43	0.33	0.08	0.02	0.30	0.45	
	MAY	19.60	160.17	27.92	8.90	0.04	0.00	0.02	0.30	0.37	
	JUN	36.45	117.97	23.87	20.38	0.30	0.14	0.02	0.56	0.76	
	JUL	40.93	104.71	33.03	24.55	2.34	0.41	0.05	1.22	1.71	
	AGO	39.45	101.37	24.18	34.96	2.79	1.11	0.05	1.03	2.22	
	SEP	51.92	77.95	23.04	51.57	8.67	1.76	0.06	1.74	3.63	
	OCT	28.68	83.58	21.96	52.95	4.09	0.38	0.06	1.15	1.71	
	NOV	9.74	78.64	14.78	46.93	0.80	0.02	0.04	0.30	0.51	
	DIC	3.34	80.05	9.12	41.16	0.01	0.00	0.03	0.07	0.24	
	<b>8</b>	ENE	4.89	88.35	6.97	20.78	0.16	0.11	0.12	0.07	0.47
		FEB	7.78	102.31	7.97	20.02	0.76	0.30	0.04	0.14	0.61
MAR		12.88	143.13	13.53	18.17	1.35	0.40	0.11	0.21	0.82	
ABR		17.10	152.22	24.00	9.97	1.21	0.60	0.18	0.28	1.15	
MAY		19.60	160.29	23.34	5.73	0.60	0.50	0.16	0.28	1.03	
JUN		36.45	117.72	22.73	14.75	2.87	1.84	0.22	0.51	2.63	
JUL		40.93	104.32	31.37	16.49	5.48	2.00	0.49	1.05	3.63	
AGO		39.45	100.98	24.56	23.16	4.86	3.13	0.45	0.83	4.52	
SEP		51.92	77.64	24.43	34.10	11.39	4.13	0.49	1.36	6.12	
OCT		28.68	83.32	21.80	33.54	5.59	1.62	0.64	0.92	3.39	
NOV		9.74	78.54	13.62	28.63	1.10	0.26	0.47	0.25	1.22	
DIC		3.34	80.10	7.72	24.53	0.14	0.08	0.27	0.06	0.64	
<b>9</b>	ENE	4.89	87.97	6.57	19.76	0.37	0.00	0.40	0.02	0.70	
	FEB	7.78	101.97	7.28	18.75	1.48	0.01	0.15	0.03	0.39	
	MAR	12.88	142.72	11.83	17.48	2.28	0.00	0.42	0.03	0.64	
	ABR	17.10	151.78	23.49	8.59	2.38	0.07	0.71	0.05	0.99	
	MAY	19.60	159.71	22.21	4.54	1.39	0.00	0.56	0.05	0.76	

<b>SUBCUENCA</b>	<b>MES</b>	<b>PREC</b>	<b>PET</b>	<b>ET</b>	<b>SW</b>	<b>PERC</b>	<b>SURQ</b>	<b>GW</b>	<b>LATQ</b>	<b>WYLD</b>
<b>10</b>	JUN	36.45	117.10	21.68	12.71	6.05	0.41	0.61	0.08	1.23
	JUL	40.93	103.67	30.03	14.09	8.77	0.58	1.18	0.19	2.12
	AGO	39.45	100.34	21.16	21.39	8.71	2.11	1.19	0.16	3.66
	SEP	51.92	77.12	21.19	31.57	17.75	2.50	1.46	0.25	4.47
	OCT	28.68	82.78	19.11	31.39	8.88	0.73	1.66	0.20	2.96
	NOV	9.74	78.08	11.98	27.29	1.81	0.02	1.17	0.07	1.65
	DIC	3.34	79.70	6.77	23.52	0.33	0.01	0.76	0.02	1.15
	ENE	4.89	88.16	7.12	36.46	0.01	0.00	0.00	0.17	0.25
	FEB	7.78	102.08	8.03	35.83	0.06	0.00	0.00	0.32	0.39
	MAR	12.88	142.77	16.21	31.42	0.50	0.00	0.00	0.51	0.57
	ABR	17.10	151.85	28.56	19.07	0.22	0.05	0.00	0.63	0.72
	MAY	19.60	160.03	28.10	9.93	0.00	0.00	0.00	0.65	0.68
<b>11</b>	JUN	36.45	117.76	23.04	21.33	0.35	0.05	0.00	1.22	1.30
	JUL	40.93	104.47	31.27	26.48	2.05	0.16	0.00	2.60	2.79
	AGO	39.45	101.13	24.19	35.65	3.18	0.63	0.00	2.22	2.89
	SEP	51.92	77.76	23.26	52.04	7.28	1.00	0.00	3.75	4.81
	OCT	28.68	83.39	21.67	53.75	3.14	0.15	0.00	2.35	2.61
	NOV	9.74	78.50	14.54	47.80	0.66	0.01	0.00	0.60	0.73
	DIC	3.34	79.95	8.73	42.29	0.01	0.00	0.00	0.12	0.25
	ENE	10.78	87.19	11.15	68.66	1.01	0.14	1.51	0.77	3.01
	FEB	16.80	99.69	14.53	68.55	0.99	0.01	0.64	1.51	2.61
	MAR	22.51	138.25	26.73	58.46	3.20	0.36	1.05	2.29	4.09
	ABR	45.05	143.20	43.94	47.75	6.12	0.86	2.55	4.73	8.47
	MAY	46.97	151.02	54.23	34.90	1.84	0.08	2.03	3.72	6.13
JUN	98.94	112.32	54.76	56.31	10.28	1.71	2.01	9.52	13.50	
JUL	102.39	102.48	64.97	62.42	17.05	1.40	4.95	13.49	20.14	
AGO	86.15	95.78	56.66	71.26	9.59	1.28	5.17	10.01	16.84	

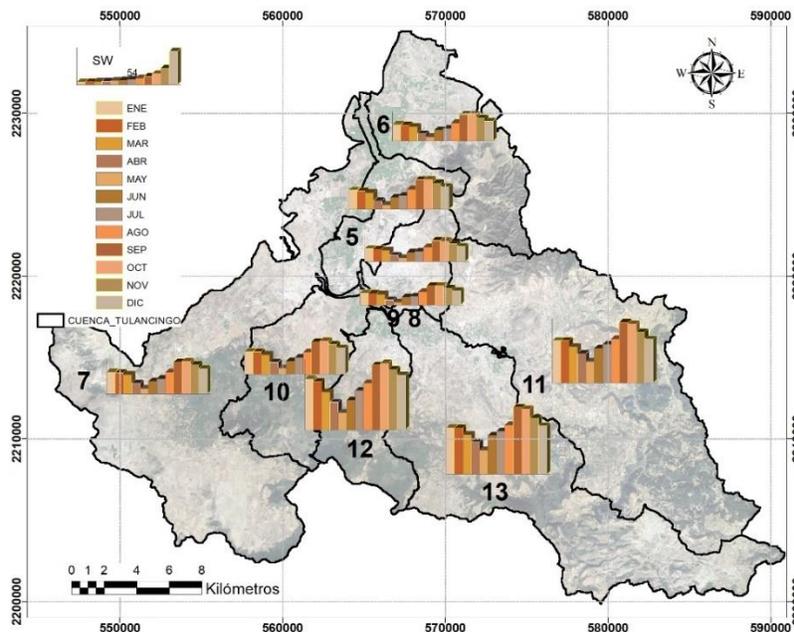
<b>SUBCUENCA</b>	<b>MES</b>	<b>PREC</b>	<b>PET</b>	<b>ET</b>	<b>SW</b>	<b>PERC</b>	<b>SURQ</b>	<b>GW</b>	<b>LATQ</b>	<b>WYLD</b>
<b>12</b>	SEP	140.24	77.13	48.18	98.17	36.74	5.91	7.94	21.73	36.03
	OCT	81.21	82.56	45.38	95.64	21.55	4.30	8.94	13.36	27.27
	NOV	23.91	77.75	29.42	82.49	4.53	0.21	6.37	3.40	10.73
	DIC	7.19	78.53	17.62	71.34	0.21	0.02	3.60	0.59	4.94
	ENE	8.63	87.08	13.52	82.33	0.46	0.04	0.15	0.37	0.98
	FEB	12.84	100.11	15.44	77.60	1.27	0.10	0.04	0.80	1.26
	MAR	18.82	141.37	32.81	60.95	1.51	0.12	0.12	0.91	1.44
	ABR	35.97	148.38	49.76	44.48	0.70	0.22	0.19	1.63	2.25
	MAY	43.78	155.55	57.46	27.80	0.58	0.28	0.11	2.18	2.75
	JUN	73.66	116.54	46.60	47.73	1.69	1.09	0.08	3.51	4.83
	JUL	88.97	103.25	58.65	63.08	7.22	1.28	0.25	6.91	8.58
	AGO	77.52	99.70	51.68	75.17	5.42	2.99	0.46	5.29	8.89
	SEP	111.07	78.40	40.83	104.50	26.30	3.42	1.10	10.29	15.02
	OCT	68.07	81.26	31.18	107.18	21.29	6.13	1.51	7.79	15.82
NOV	15.57	76.54	20.74	97.72	3.09	0.15	1.09	1.53	3.25	
DIC	6.74	78.46	14.97	88.36	0.69	0.08	0.57	0.40	1.56	
<b>13</b>	ENE	10.78	87.26	11.78	75.00	1.13	0.15	1.90	0.53	3.27
	FEB	16.80	99.74	15.26	74.53	1.13	0.03	0.80	0.89	2.24
	MAR	22.51	138.28	27.84	63.60	3.73	0.40	1.25	1.45	3.55
	ABR	45.05	143.24	45.84	51.96	6.92	0.95	3.01	2.89	7.22
	MAY	46.97	151.12	55.81	38.63	2.07	0.13	2.40	2.31	5.18
	JUN	98.94	112.49	55.76	62.08	11.52	1.87	2.86	5.73	10.76
	JUL	102.39	102.68	66.35	69.32	19.67	1.59	5.85	7.70	15.48
	AGO	86.15	96.00	58.14	79.28	10.88	1.43	6.30	5.88	14.03
	SEP	140.24	77.31	49.20	107.97	42.70	6.38	10.43	12.74	30.07
	OCT	81.21	82.74	46.86	104.93	25.33	4.57	11.70	7.91	24.95
	NOV	23.91	77.88	31.13	90.47	5.24	0.25	8.09	2.14	11.34

<b>SUBCUENCA</b>	<b>MES</b>	<b>PREC</b>	<b>PET</b>	<b>ET</b>	<b>SW</b>	<b>PERC</b>	<b>SURQ</b>	<b>GW</b>	<b>LATQ</b>	<b>WYLD</b>
	DIC	7.19	78.61	19.11	77.97	0.24	0.02	4.51	0.44	5.82

PREC es precipitación, PET es evapotranspiración potencial, ET es evapotranspiración, SW es el contenido inicial de agua en el suelo, PERC es el agua que se infiltra en el perfil del suelo, SURQ es el escurrimiento superficial, GW es flujo base, LATQ es la contribución del flujo lateral a la corriente, WYLD es producción de agua.

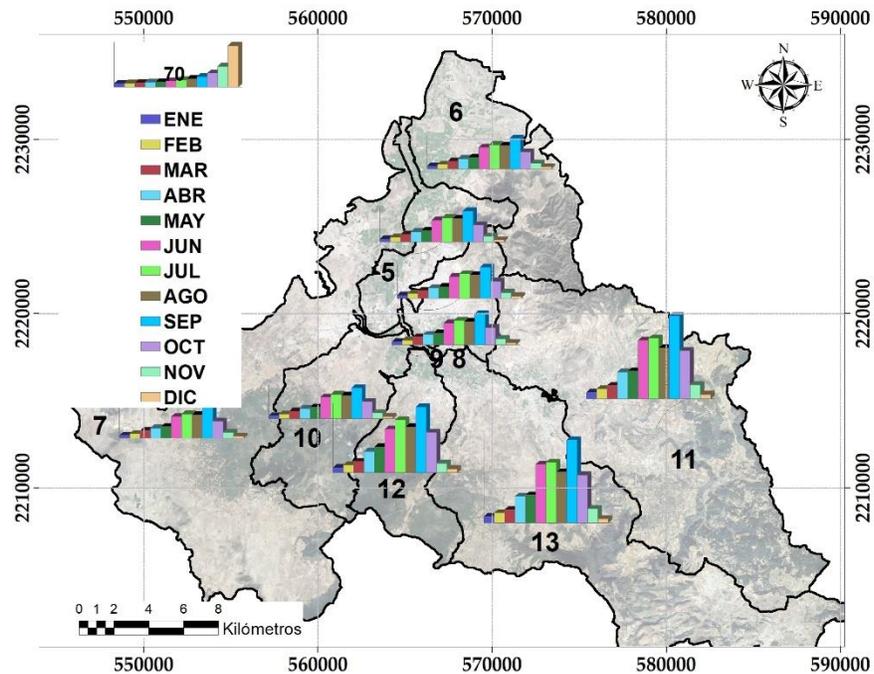
Con el fin de analizar el comportamiento espacial de los elementos del balance hídrico a nivel de subcuenca, a continuación, se presenta su distribución de forma individual. Donde se identificó de manera constante que las estimaciones más altas de lámina en los elementos del balance se asociaron a las subcuencas altas (11, 12 y 13), cuyas corrientes principales son Río Chico (aguas arriba), Arroyo de Ventoquipa y río San Lorenzo, respectivamente. Por el contrario, los valores inferiores de lámina, se relacionaron con las subcuencas bajas (5, 6, 7, 8, 9 y 10), donde sus corrientes principales son el Río Tulancingo (aguas abajo), el arroyo de San Vicente, el río Los Enlamaderos, el Río Chico (aguas abajo), el Río Tulancingo (aguas arriba) y el arroyo Camarones, en ese mismo orden.

Como ejemplo, los valores de lámina de **Contenido de agua inicial almacenada en el perfil del suelo (SW)**<sup>[R3]</sup>, fueron en promedio 2.8 veces mayores que los obtenidos para las subcuencas bajas (ver Figura 30).



**Figura 30. Distribución media mensual de contenido de agua inicial en el perfil del suelo (SW) en la cuenca Tulancingo, en mm.**

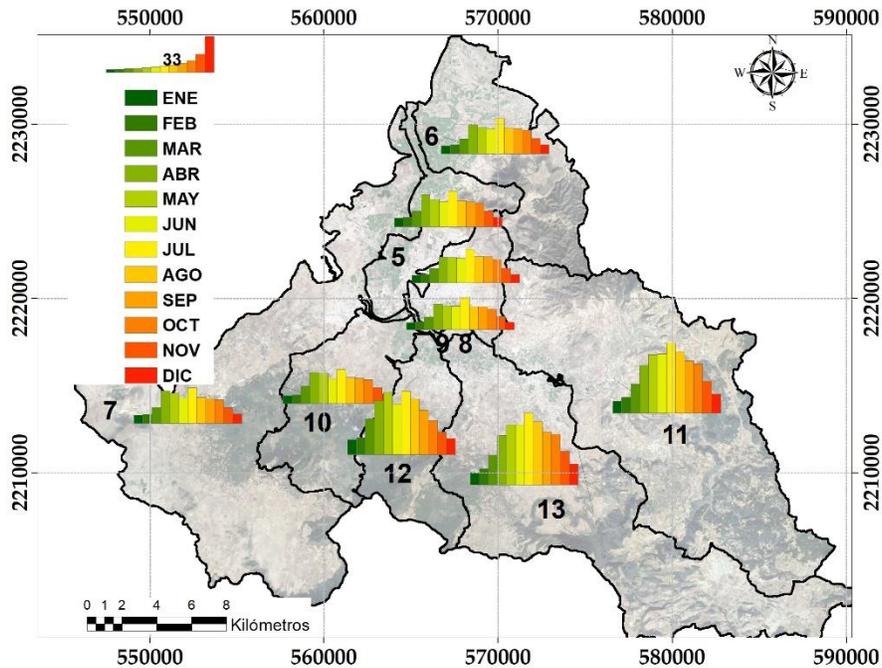
**Precipitación (PREC).** Al analizar la distribución media mensual de la precipitación, esta presenta una tendencia superior de mayo a octubre y menor de noviembre a abril en todas las subcuencas. Lo anterior coincide con lo reportado por Herrera *et al.* (2017) que, para su análisis de la cuenca Tulancingo, separan los meses lluviosos en dos periodos (mayo-julio y agosto-octubre), y advierten una alta probabilidad de que se presente un evento extremo de agosto a octubre. En relación con la magnitud de este elemento, analizado desde el punto de vista de su distribución espacial, las subcuencas altas presentaron en promedio 2.2 veces más la altura de lámina de precipitación que las subcuencas bajas.



**Figura 31. Distribución media mensual de Precipitación (PREC) en la cuenca Tulancingo, en mm.**

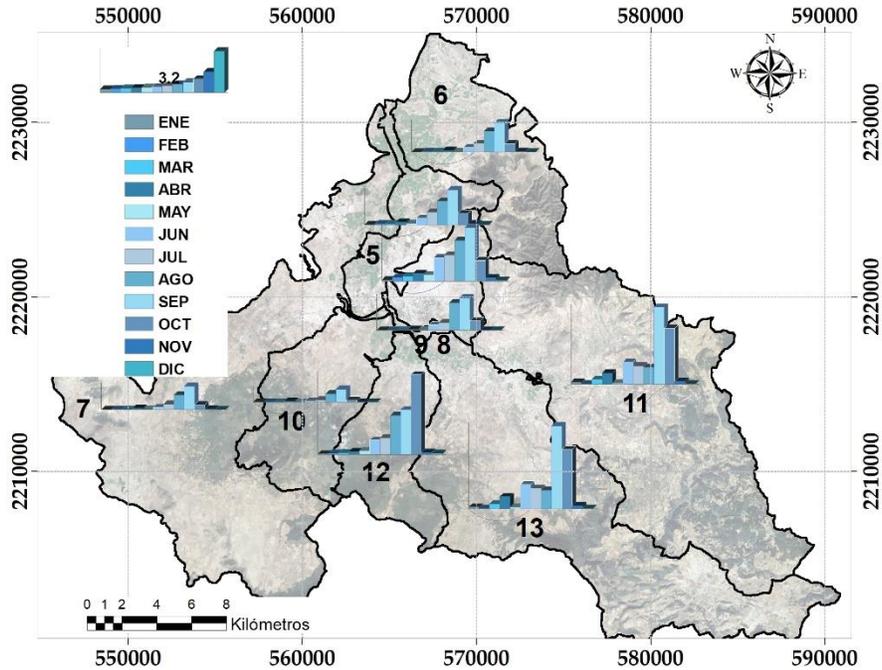
**Evapotranspiración (ET).** Los valores máximos de lámina media mensual se presentaron durante el verano (de julio a septiembre), momento en que la producción de cultivos en México es mayor (Monterroso y Gómez, 2021). Como se había mencionado previamente, al dominar el uso agrícola en un 64 % la superficie de la cuenca (470 km<sup>2</sup>), resulta lógico que la mayor evapotranspiración

coincida temporalmente; así como el hecho de que en las cuencas bajas (5, 6 8 y 9) se presente menor demanda por evapotranspiración, ya que es la región donde se encuentra concentrada la población de la ciudad de Tulancingo.



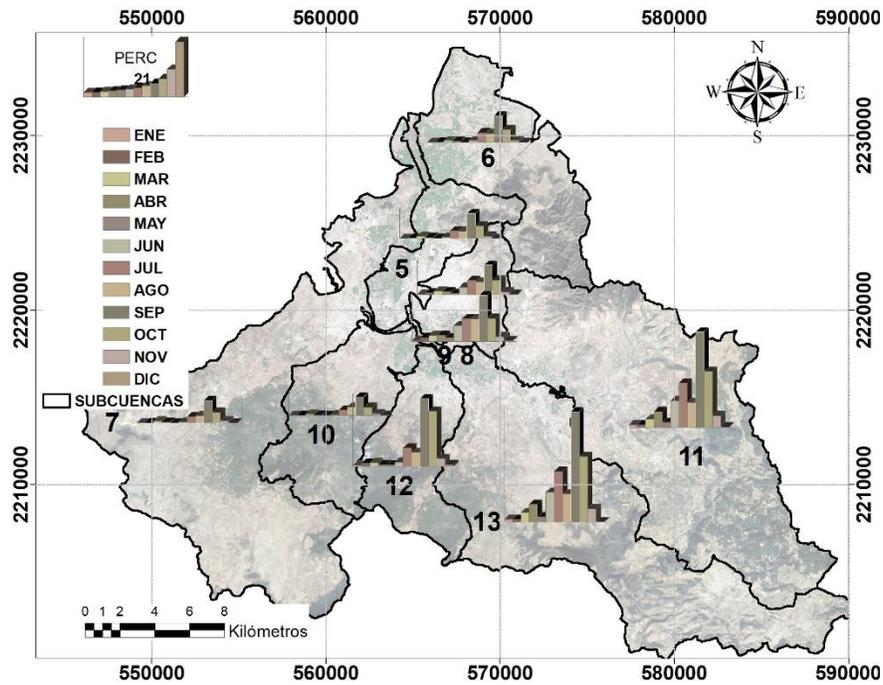
**Figura 32. Distribución media mensual de la evapotranspiración (ET) en la cuenca Tulancingo, en mm.**

**Escorrentamiento superficial (SURQ).** Su valor máximo coincidió con el mes más lluvioso (septiembre); sin embargo, para las subcuencas 7 y 10 resultó considerablemente menor. En la subcuenca 7, la agricultura de temporal en combinación con bosque de pino encino son las cubiertas vegetales en el 78 % de su superficie; en la subcuenca 10, esa misma combinación representa el 72 %. La dominancia de campos agrícolas (como es el caso de las subcuencas 7 y 10), es una situación que frecuentemente incrementa la evapotranspiración y reduce el escurrimiento superficial en ella (Qiu *et al.*, 2011), fenómeno que se observa en el presente estudio.



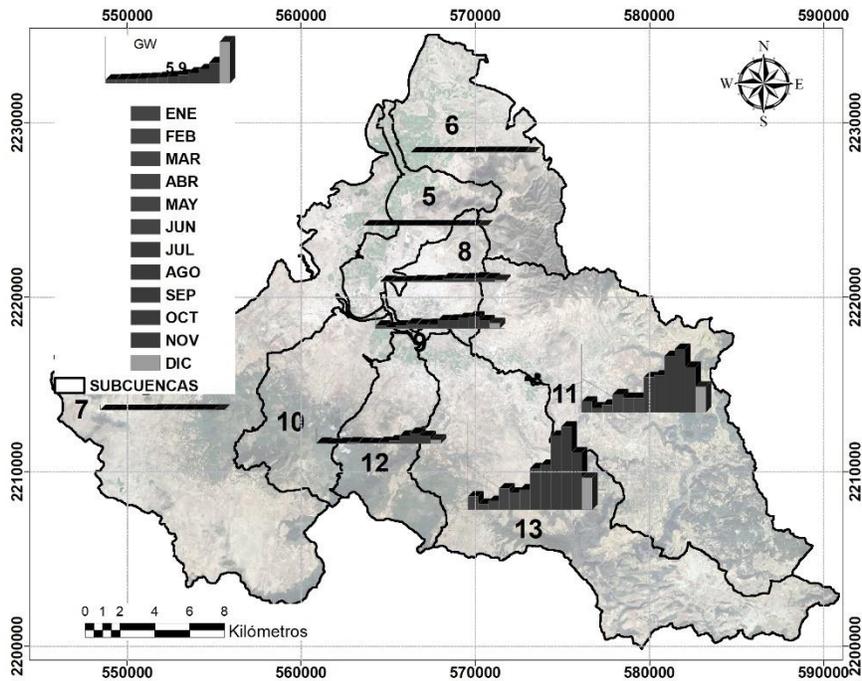
**Figura 33. Distribución media mensual del escurrimiento superficial (SURQ) en la cuenca Tulancingo, en mm.**

**Infiltración (PERC).** En la cuenca Tulancingo, el periodo y ubicación del máximo escurrimiento coincide con el de máxima infiltración. En ese sentido, Santana *et al.* (2022) aseveran que características como la permeabilidad del suelo o la pendiente que inciden en una menor tasa de infiltración determinan la mayor tasa de escurrimiento en una cuenca. En la cuenca de estudio, el tipo de suelo dominante (Phaeozem), que se caracteriza por tener buena fertilidad y porosidad (IUSS, 2015), y se encuentra distribuido en el 45.3 % de la cuenca, se asume que coadyuva a la coincidencia del periodo de máxima infiltración (PERC) con el de máximo escurrimiento superficial (SURQ) en la zona de estudio.



**Figura 34.** Agua percolada más allá del perfil del suelo (PERC) en la cuenca Tulancingo, en mm.

**Flujo Base (GW).** Los máximos de precipitación e infiltración observados en las subcuencas altas se observaron en su aporte al flujo base (GW), destacando su influencia en las subcuencas 11 y 13, donde la suma de sus valores medios mensuales resultó ser 2.5 veces más que la suma en las subcuencas 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 12 (ver Figura 35).



**Figura 35. Contribución del agua subterránea (GW) en la cuenca Tulancingo, en mm.**

### 6.3.2 Balance medio mensual por subcuenca, SW1.

La disponibilidad media mensual de agua final en el suelo No. 1 (SW1), se presenta en el Cuadro 16, para cada una de las subcuencas de Tulancingo. En él, la época de mayor disponibilidad se observó en septiembre, en las subcuencas altas: 11, 12 y 13 con láminas de 139.6, 143.9 y 139.5 mm, respectivamente. Dichas cuencas superan en poco más del doble a la subcuenca 5 (que presentó 63.8 mm), donde se encuentra la salida de la cuenca Tulancingo. En las subcuencas 8 y 9, donde se ubican los asentamientos de la ciudad de Tulancingo, las láminas de disponibilidad fueron de 45.6 y 40.6 mm, respectivamente.

El resultado anterior, es atribuible a la diferencia en proporción de la vegetación presente en ambos grupos de cuencas: mientras las cuencas altas poseen mayor densidad de bosques y vegetación secundaria arbustiva, las cuencas bajas presentan pastizal inducido y asentamientos. Esta condición es similar a la de la cuenca del río Luanhe, al norte de China, donde se identificó que en

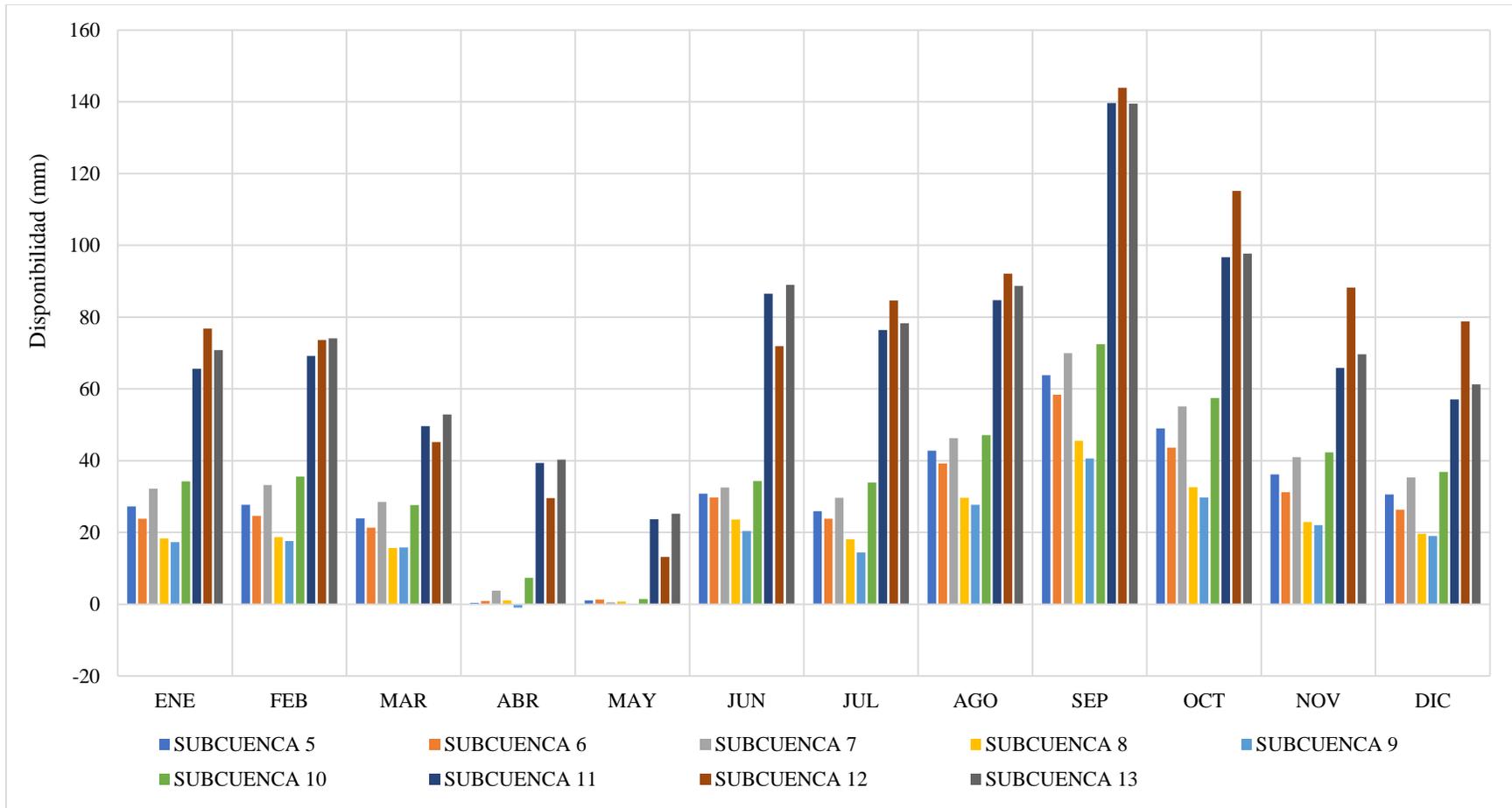
la superficie forestal no solo aumentó la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo, sino también se redujo el escurrimiento superficial en un 11 % (Yang *et al.*, 2019).

**Cuadro 16. Disponibilidad de agua final en el suelo, valor medio mensual por subcuenca (mm), SW1.**

MES	SUBCUENCA								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>ENE</b>	27.2	23.8	32.2	18.3	17.3	34.2	65.6	76.8	70.8
<b>FEB</b>	27.7	24.6	33.2	18.7	17.6	35.5	69.2	73.6	74.1
<b>MAR</b>	23.9	21.3	28.5	15.7	15.8	27.6	49.6	45.2	52.9
<b>ABR</b>	0.4	0.9	3.8	1.1	-1.0	7.3	39.3	29.6	40.3
<b>MAY</b>	1.0	1.3	0.5	0.7	0.0	1.4	23.7	13.2	25.2
<b>JUN</b>	30.8	29.7	32.5	23.6	20.4	34.3	86.5	71.9	89.0
<b>JUL</b>	25.9	23.8	29.6	18.1	14.4	33.9	76.4	84.6	78.2
<b>AGO</b>	42.8	39.2	46.3	29.6	27.7	47.1	84.7	92.1	88.7
<b>SEP</b>	63.8	58.4	70.0	45.6	40.6	72.4	39.6	43.9	139.5
<b>OCT</b>	49.0	43.6	55.1	32.6	29.7	57.5	96.7	15.1	97.7
<b>NOV</b>	36.1	31.2	41.0	22.9	22.1	42.3	65.9	88.2	69.7
<b>DIC</b>	30.5	26.3	35.3	19.7	19.0	36.9	57.1	78.8	61.3

La Figura 36 refleja el impacto de la precipitación sobre la disponibilidad en cada subcuenca, al exponer de igual forma sus valores máximos en el mes de septiembre. La tendencia al comparar la disponibilidad de cuencas altas con cuencas bajas resultó análoga para la mayoría de las épocas; sin embargo, en abril y mayo, la diferencia se acentúa. Por ejemplo, en abril la cuenca de mayor disponibilidad fue la 13 con 40.3 mm, mientras que la subcuenca 9 presentó déficit de -1.0 mm. La disminución del contenido de humedad en el suelo en las cuencas bajas se asocia al aumento en la demanda evapotranspirativa y escasez de precipitación en esa temporada, además de la impermeabilidad que caracteriza al suelo en la zona urbana establecida en las cuencas 8 y 9. De acuerdo con lo que Puskás y Farsang (2009) han mencionado, las modificaciones en el suelo urbano frecuentemente provocan diversos cambios en la dinámica fluvial, entre las que destaca la

modificación en los regímenes de humedad, por lo que se espera que en las cuencas 8 y 9 reflejen fenómenos asociados a estas modificaciones.



**Figura 36. Disponibilidad de agua final en el suelo, valor medio mensual por subcuenca (mm), SW1.**

### 6.3.3 Balance medio mensual por subcuenca, SW2.

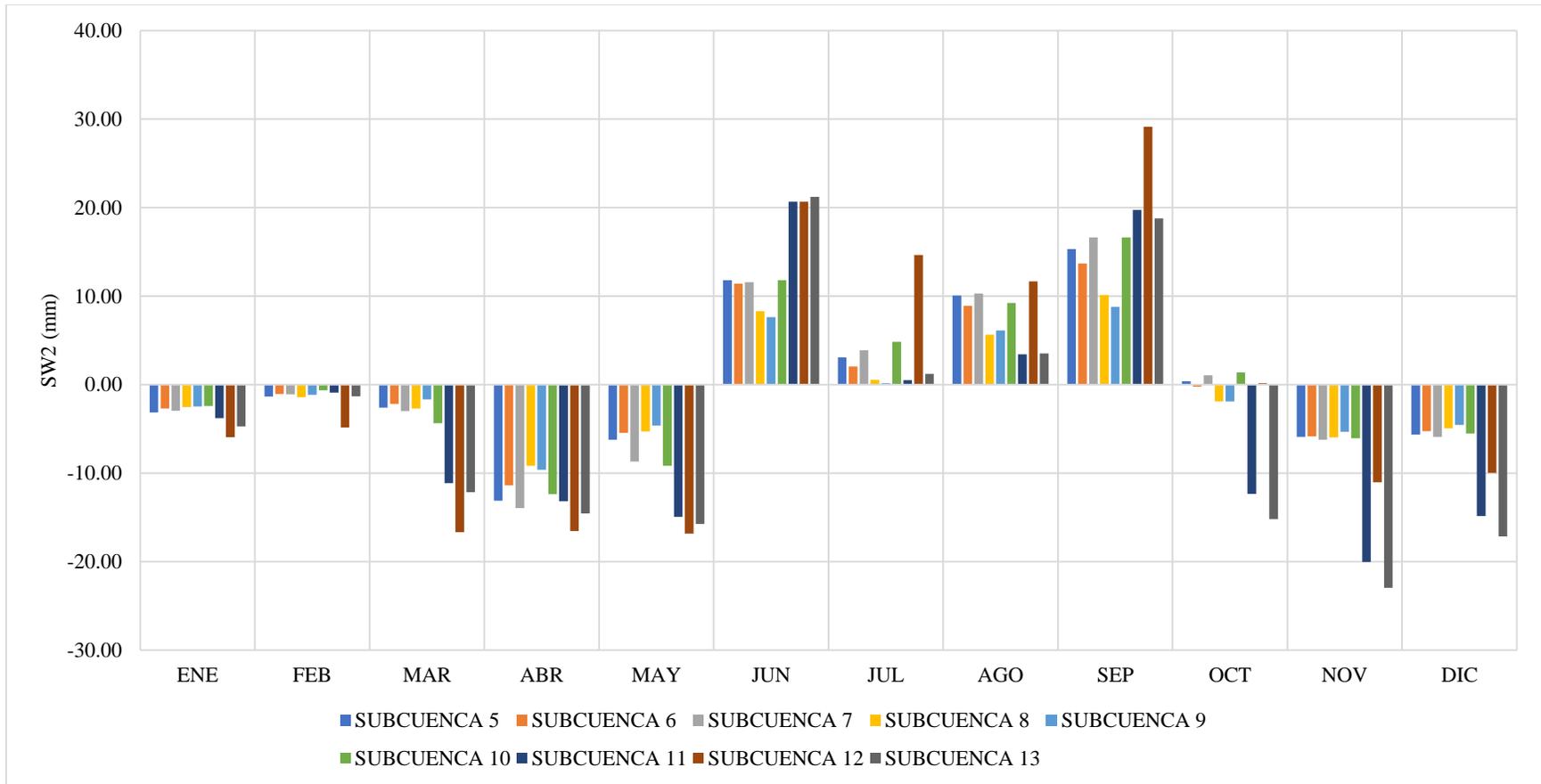
En el escenario de balance que supone disponibilidad de agua subterránea inicial nula, o disponibilidad de agua final en el suelo No. 2 (SW2), se obtuvieron los valores presentes en el Cuadro 17. Como se mencionó con anterioridad en el presente estudio, la disponibilidad de agua inicial representa aproximadamente un 40% de la suma total de lámina de los elementos del balance. Por lo tanto, como resultado de su anulación, el déficit se incrementó de manera considerable en los meses de noviembre a mayo, cuyo rango va de **- 20.81 mm** de lámina, en el mes de diciembre para la cuenca 13, hasta **- 0.31 mm** en el mes de febrero para la subcuenca 10. La oferta positiva se observó de junio a septiembre.

**Cuadro 17. Resultados del escenario de disponibilidad de agua final en el suelo No. 1 (SW2), valor medio mensual por subcuenca, en mm.**

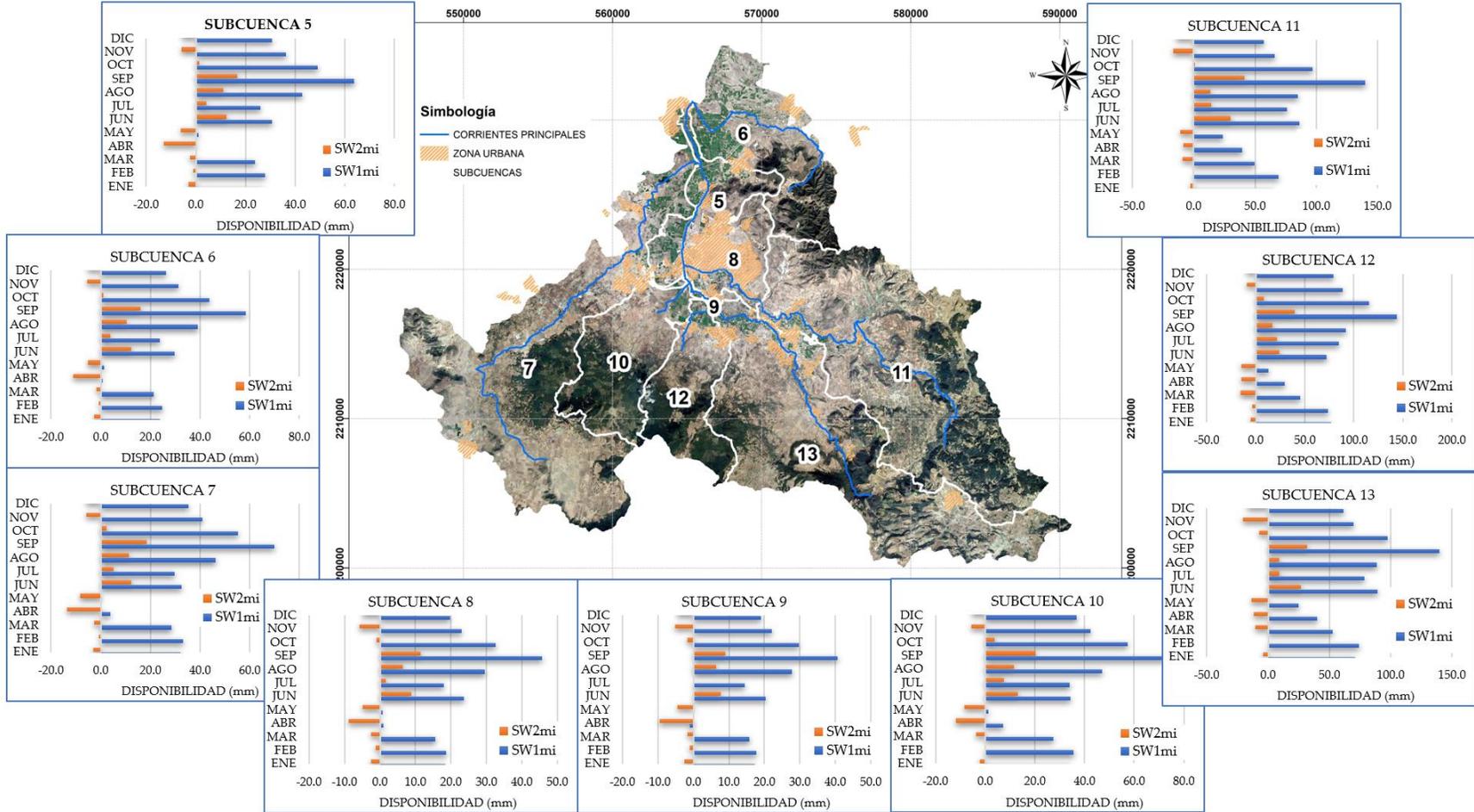
MES	SUBCUENCA								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ENE	-3.09	-2.62	-2.86	-2.46	-2.45	-2.24	-3.03	-5.55	-4.18
FEB	-1.22	-0.81	-0.93	-1.28	-1.14	-0.31	0.62	-4.02	-0.42
MAR	-2.42	-1.88	-2.75	-2.50	-1.64	-3.83	-8.81	-15.74	-10.69
ABR	-12.86	-10.96	-13.64	-8.89	-9.55	-11.72	-8.42	-14.90	-11.66
MAY	-5.99	-5.11	-8.38	-5.00	-4.57	-8.50	-11.19	-14.65	-13.44
JUN	<b>12.24</b>	<b>12.20</b>	<b>12.12</b>	<b>8.80</b>	<b>7.70</b>	<b>13.01</b>	<b>30.18</b>	<b>24.19</b>	<b>26.94</b>
JUL	<b>4.08</b>	<b>3.93</b>	<b>5.09</b>	<b>1.59</b>	<b>0.36</b>	<b>7.45</b>	<b>14.01</b>	<b>21.55</b>	<b>8.93</b>
AGO	<b>10.90</b>	<b>10.36</b>	<b>11.33</b>	<b>6.46</b>	<b>6.28</b>	<b>11.45</b>	<b>13.44</b>	<b>16.97</b>	<b>9.40</b>
SEP	<b>16.75</b>	<b>15.99</b>	<b>18.39</b>	<b>11.48</b>	<b>9.02</b>	<b>20.38</b>	<b>41.48</b>	<b>39.41</b>	<b>31.53</b>
OCT	<b>1.32</b>	<b>1.19</b>	<b>2.19</b>	-0.97	-1.70	<b>3.72</b>	<b>1.03</b>	<b>7.96</b>	-7.27
NOV	-5.66	-5.50	-5.91	-5.71	-5.23	-5.46	-16.63	-9.50	-20.81
DIC	-5.61	-5.19	-5.83	-4.87	-4.52	-5.40	-14.26	-9.57	-16.69

Este escenario de déficit, aunque poco probable, da evidencia de la importancia del contenido de humedad inicial en el suelo y advierte sobre la continuación de la sobreexplotación del acuífero 1317 Valle de Tulancingo. En la Figura 37 se muestra que, al ser la precipitación la única fuente de abastecimiento para los requerimientos dentro de la cuenca, esta sólo resulta suficiente para

tener disponibilidad de agua final en el suelo durante cuatro de los doce meses. Salvo la construcción de infraestructura hidráulica para retención y captación hídrica, la tendencia en el déficit se espera que pudiera ir en ascenso. Finalmente, en la Figura 38, donde se incluye en una sola gráfica SW1 y SW2 por subcuenca; en abril se observa un panorama complicado en relación con la disponibilidad de agua, sobre todo en las subcuencas 5, 6, 7, 8, 9 y 10.



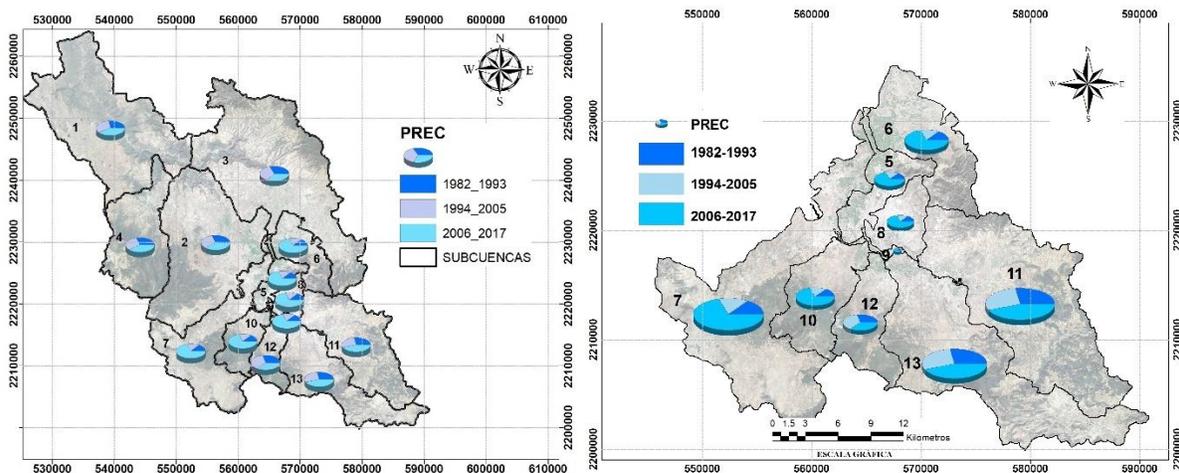
**Figura 37. Escenario de disponibilidad final de agua en el suelo No. 2, valor medio mensual por subcuena (mm), SW2.**



**Figura 38.** Disponibilidad final de agua en el suelo No. 1 (SW1) y escenario de disponibilidad final de agua en el suelo No 2 (SW2), valores medios mensuales por subcuenca, en mm.

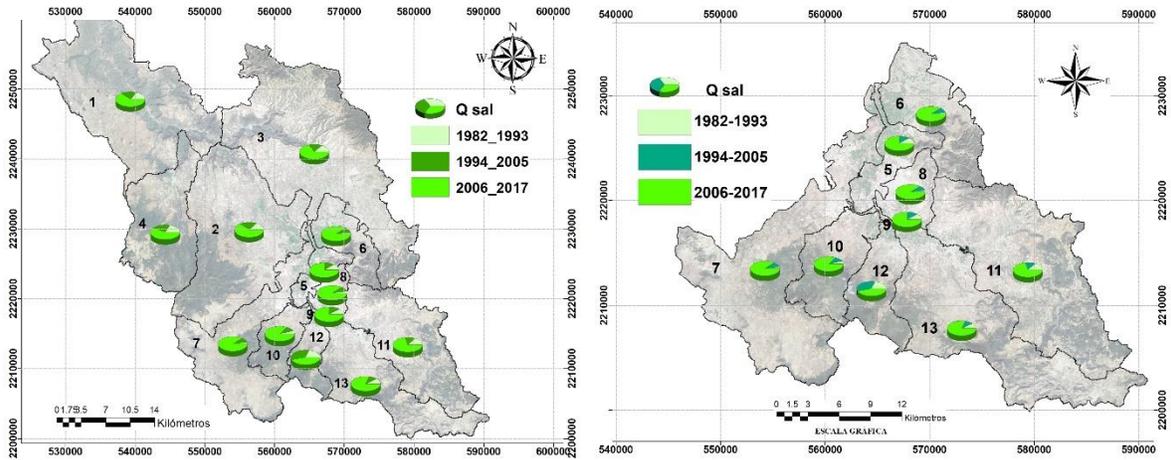
### 6.3.4 Análisis por periodo: Elementos del balance.

Se calcularon los valores medios anuales de precipitación y escurrimiento por subcuenca, separados en tres periodos de 12 años: A) 1982-1993, B) 1994-2005 y C) 2006-2017. Dichos valores, al ser graficados en un mapa (Figura 39), se observa que el periodo de 2006-2017 fue superior a los dos periodos precedentes.



**Figura 39. Precipitación media anual en los periodos: 1982-1993, 1994-2005 y 2006-2017 de las cuencas: Venados (izquierda) y Tulancingo (derecha).**

La disparidad del valor medio anual de precipitación en el tercer periodo se reflejó en los resultados de caudal medio anual de salida por subcuenca obtenido con el modelo SWAT, tal como se aprecia en la Figura 40.



**Figura 40. Caudal de salida, valor medio anual en los periodos: 1982-1993, 1994-2005 y 2006-2017 de las cuencas: Venados (izquierda) y Tulancingo (derecha).**

El modelo GAM aplicado a cada conjunto de valores medios mensuales de las variables: PREC, SURQ, ET, PERC, GW, SW y SW1; así como a la evapotranspiración potencial (PET) y la producción de agua (WYLD), por periodo de tiempo, fue la base para la elaboración del 0, en el que se muestran los valores de Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), para aquellas variables cuyo ajuste se consideró favorable, es decir, con base en la medida que su varianza se explica en más de un 60 %.

**Cuadro 18. Coeficientes de Determinación ( $R^2$ ), obtenidos de la aplicación del modelo GAM, para cada variable por subcuenca.**

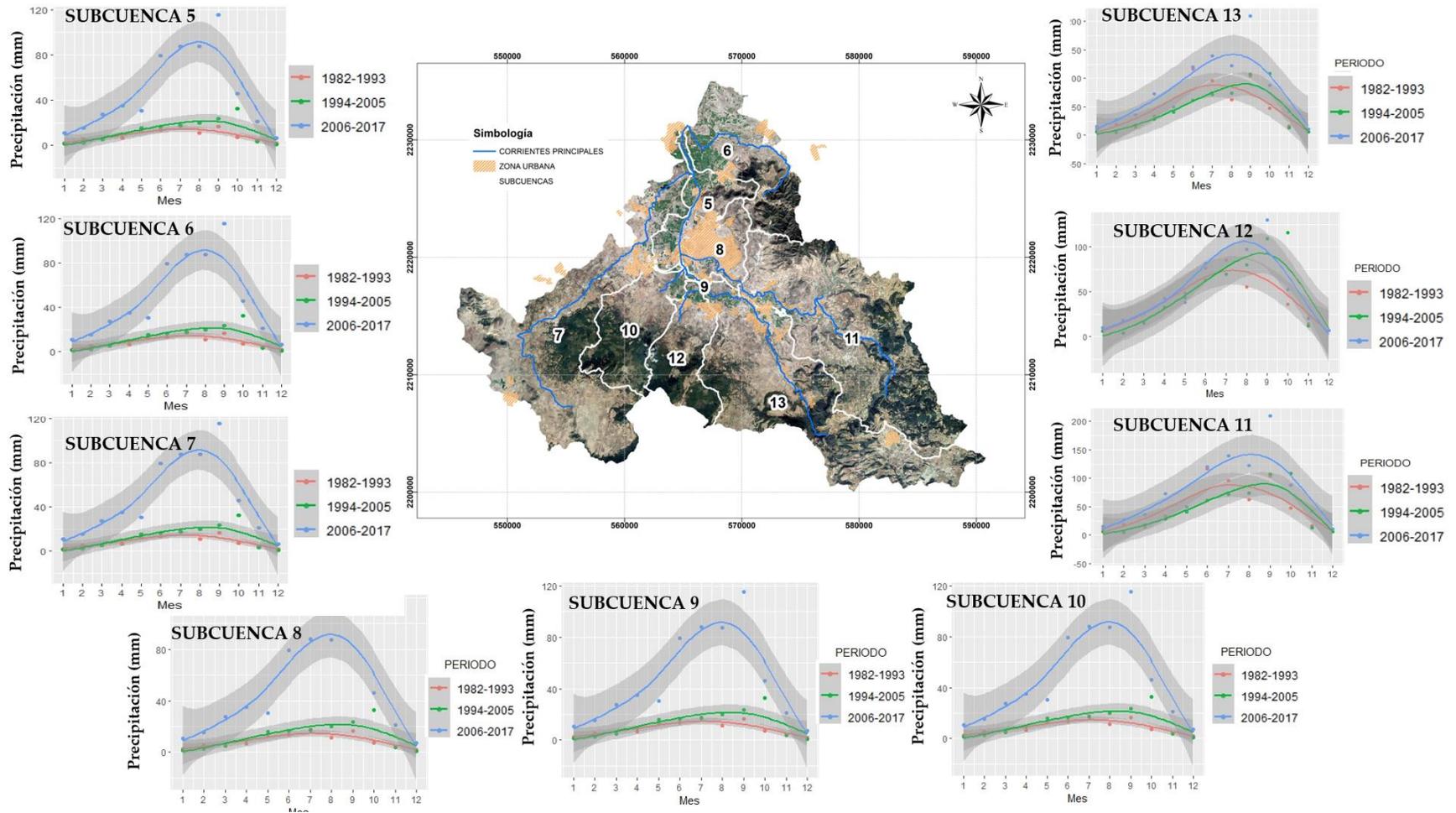
SUBCUENCA		PREC	ET	GW	WYLD	PET	SW	SW1
5	$R^2$	0.64	0.79	-	-	0.94	0.83	0.71
		C***	AC***			B*	C***	C***
6	$R^2$	0.64	0.81	0.72	-	0.94	0.84	0.71
		C***	A C***	C***		B*	C***	C***
7	$R^2$	0.64	0.81	0.72	-	0.94	0.84	0.73
		C***	AC***	C***		B*	C***	C***
8	$R^2$	0.64	0.84	0.68	-	0.94	0.85	0.71
		C***	AC***	C***		B*	C***	C***
9	$R^2$	0.64	0.81	0.75	0.61	0.94	-	0.68
		C***	AC***	C***	C***	B*		C***
10	$R^2$	0.77	0.93	-	0.63	0.94	0.84	0.75
		A***						
		C**	BC*		C***		C***	C***
11	$R^2$	0.77	0.93	-	0.63	0.94	0.84	0.67
		A***						
		C**	BC*		C***		C***	A***
12	$R^2$	0.81	0.95	-	-	0.94	0.93	0.84
		A***	C*				B*C***	AC***
13	$R^2$	0.77	0.93	0.65	0.64	0.93	0.84	0.66
		A***						
		C**	BC*	C***	C***		C***	A***

A, B y C, son los periodos 1982-1993, 1994-2005 y 2006-2017, respectivamente; \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ; PREC es precipitación, ET es evapotranspiración, GW es flujo base, WYLD es producción de agua, PET es evapotranspiración potencial, SW es el contenido inicial de agua en el suelo y SW1 es la disponibilidad de agua final en el suelo.

El modelo representó mejor el comportamiento de la Evapotranspiración Potencial media mensual (PET), al observar valores de  $R^2$  superiores a 0.9 en todas las subcuencas. Posteriormente se

encuentra la evapotranspiración actual (ET), con valores entre 0.79 y 0.95, seguido del contenido de agua inicial en el suelo (SW) con  $0.83 < R^2 < 0.93$ , la disponibilidad de agua final en el suelo No. 1 (SW1) con  $0.66 < R^2 < 0.84$ , la precipitación (PREC) con  $0.64 < R^2 < 0.81$ , el flujo base (GW) con  $0.65 < R^2 < 0.75$  y finalmente la producción de agua (WYLD) con  $0.61 < R^2 < 0.64$ . Los espacios vacíos en el cuadro anterior indican la obtención de valores de  $R^2$  inferiores a 0.6; condición que se asumió como un ajuste deficiente del modelo al comportamiento medio mensual de la variable; el escurrimiento superficial observado en cada subcuenca (SURQ) y el agua que se infiltra en el perfil del suelo (PERC) presentaron esa condición. Así, el nivel de significancia que se obtuvo en este estudio para la función de ajuste en el periodo 2006-2017 (C), en su mayoría  $p < 0.001$ , resultó similar al encontrado por Dubos *et al.* (2022), quienes demostraron la efectividad de la aplicación del modelo GAM a datos climáticos; solo que en este caso también aplica para el ajuste del comportamiento medio mensual para las variables: ET, GW, WYLD, PET, SW y SW1.

El modelo GAM ofreció, mediante la librería ggplot2, la obtención de líneas de tendencia suavizadas para cada periodo, flexibles en la forma de las relaciones entre la variable explicativa y su respuesta (Ouarda *et al.*, 2018). La Figura 41 presenta las líneas de tendencia suavizadas con el modelo GAM de los valores medios mensuales de precipitación por periodo en cada subcuenca. En ella, la diferencia del periodo 2006-2017 resultó estadísticamente significativa en seis de las nueve subcuencas, dada la separación entre bandas con un nivel de confianza del 95 %. En la Figura 42 se expusieron las mismas gráficas, pero ahora para la variable caudal de salida (FLOW OUT) en cada subcuenca donde, aun cuando el ajuste del Modelo GAM resultó insuficiente en 4 de las 9 subcuencas ( $0.42 < R^2 < 0.59$ ), los valores graficados muestran diferencias muy marcadas de manera similar a la precipitación.



**Figura 41. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para valores medios mensuales de precipitación por subcuenca, en mm.**

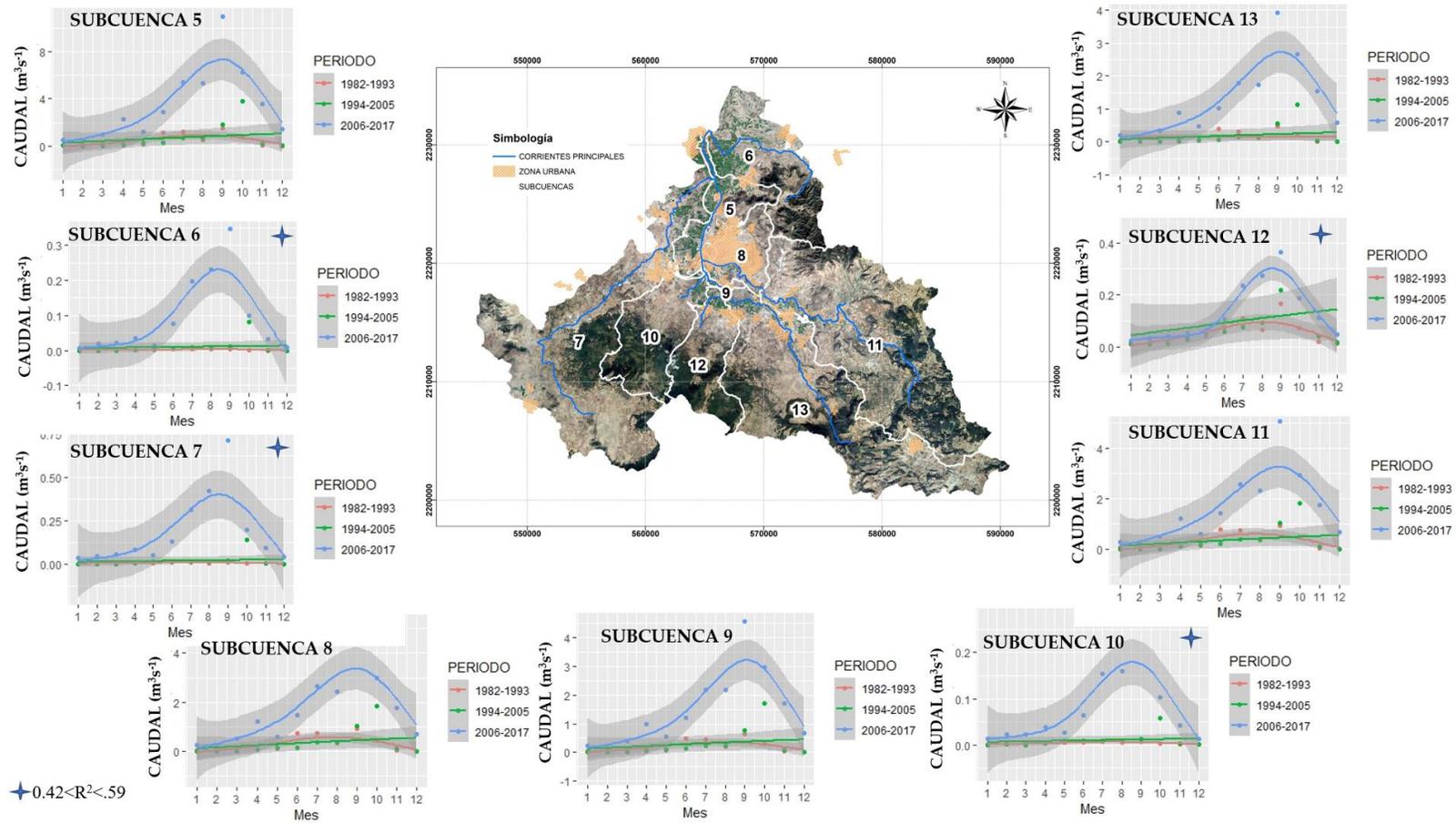


Figura 42. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para valores medios mensuales de caudal de salida por subcuenca, en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

### **6.3.5 Análisis por periodo: Disponibilidad de agua final en el suelo (SW1).**

En el apartado 7.3.2 se refirió el hecho de que la mayor disponibilidad de agua final en el suelo No. 1 se observó en las subcuencas altas (11, 12 y 13), y el mes coincidente en que se presentó dicho máximo en todas las subcuencas fue en el mes septiembre. Ahora, al analizar su disponibilidad temporal, diferenciándola por periodo, ésta es correspondiente en su comportamiento con la precipitación y el escurrimiento (registrado en la estación hidrométrica Venados). El último periodo (2006-2017) supera los previos, y la diferencia es estadísticamente significativa (ver Figura 43).

La disponibilidad, así como los escurrimientos registrados en la estación hidrométrica Venados, coinciden con lo encontrado por Mendoza *et al.*, (2018) para la cuenca Metztlán. El régimen de los escurrimientos medios mensuales observó cambios que evidencian una tendencia a la baja de los escurrimientos en el periodo seco, y una tendencia a incrementar en el periodo húmedo. Dicho estudio abarcó de 1937 a 2008, a diferencia del presente estudio que fue de 1982 a 2017. La disponibilidad presenta una clara tendencia a acentuar su disminución en el periodo seco, e incrementarse en el periodo húmedo. Así, las subcuencas bajas, de la 5 a la 10, advierten un aumento significativo en la disponibilidad de agua subterránea en el último periodo de análisis (2006-2017), producto del incremento en precipitación. La misma situación se observó en la separación que el último periodo de información disponible presenta tanto la estación hidrométrica Venados (2006-2013) como el escurrimiento de la subcuenca 1 (2006-2017).

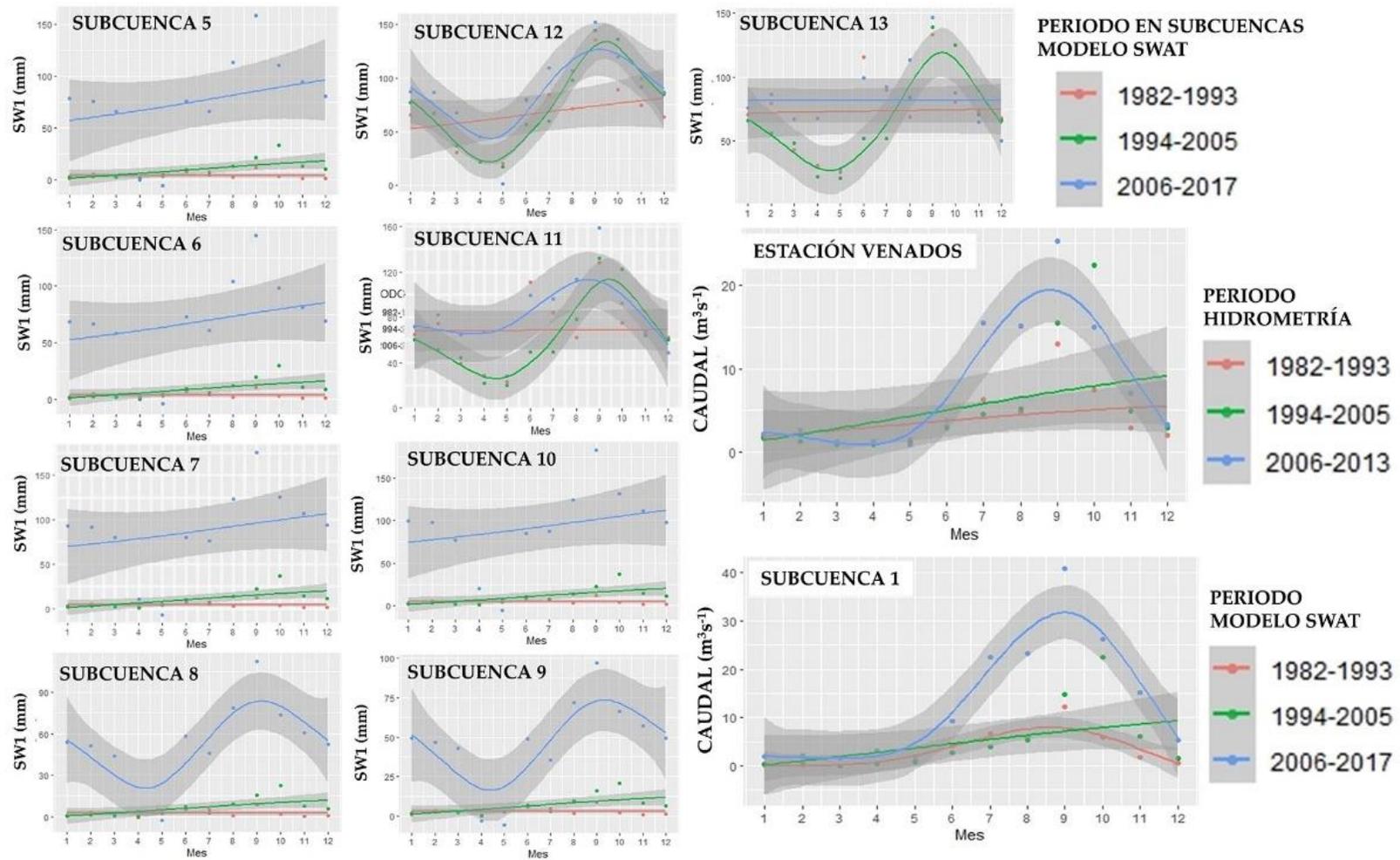


Figura 43. Funciones de tendencia suavizadas con el modelo GAM para: Disponibilidad media mensual de agua final en el suelo por subcuenca (SWI), en mm; caudales de escurrimiento medio mensual medidos en la estación hidrométrica Venados y los estimados con SWAT hacia la cuenca de salida (subcuenca 1), en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ . El área gris indica un intervalo de confianza del 95%.

## **CAPÍTULO 7. MEDIDAS PROPUESTAS PARA LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO EN LA CUENCA TULANCINGO**

En la parte baja de las cuencas de los ríos: Enlamaderos (subcuenca 7), Grande de Tulancingo (subcuenca 5) y el Arroyo San Vicente (subcuenca 6) se ubica el Distrito de Riego 028 Tulancingo, donde el 97 % de la siembra de cultivos es de tipo forrajero (Torres *et.al.*, 2021). La ganadería bovina con fines de producción de leche es una de las actividades principales (Ruíz *et. al.*, 2021). En dicha región, se recomienda incorporar especies alternativas en sus sistemas de producción, como por ejemplo de canola y soya. Estudios como el realizado por Reta *et.al.*, (2015; 2010) en la región Lagunera, encontraron que incrementa la productividad del agua y que, en relación con la alfalfa, los sistemas de producción alternativos produjeron mayores rendimientos de materia seca, y alcanzaron el 75 a 81 % del rendimiento de proteína cruda por hectárea, al utilizar el 83 % del volumen de agua requerido por la alfalfa. A dicha recomendación, se suma la incorporación del pasto switchgrass (*Panicum virgatum*) que, mediante un experimento en bloques completos al azar realizado por Rodríguez *et al.* (2021), donde evaluaron su establecimiento en la región de Tulancingo, así como el del pasto maicero (*Tripsacum dactyloides*) y el de zacatón alcalino (*Sporobolus airoides*), encontraron que el mayor rendimiento de forraje fue de switchgrass (3.5 t materia seca ha<sup>-1</sup>,  $p < 0.0001$ ), superando al pasto maicero y zacatón alcalino en 3.0 y 4.9 veces, respectivamente. Finalmente, para esta misma región, se recomienda la tecnificación de la red de conducción y del sistema de riego predominante (gravedad), acciones que, sin duda, contribuirían a la reducción del consumo de agua con fines agrícolas.

Para la zona urbana, que comprende la parte baja de las cuencas Río Chico (subcuenca 8) y San Lorenzo (Subcuenca 9), así como aguas abajo de su confluencia, donde toma el nombre de río Grande de Tulancingo (Subcuenca 5), se proponen las siguientes medidas de conservación:

1. En las viviendas: La reutilización del agua gris, que proviene de la regadera, lavamanos y lavadora, para usar en el baño. La cosecha el agua de lluvia (de azoteas y techos), para el riego de jardines y limpieza de pisos o ropa, por ejemplo. Ambas acciones, de acuerdo con el estudio realizado por Alzati *et al.* (2021) en la ciudad de Pachuca, probaron reducir la huella de escasez hídrica directa (referida a los hábitos de consumo).
2. Campañas de concientización a la población para fomentar el consumo responsable del recurso y motivar a la ciudadanía a reportar de manera oportuna las fugas en el sistema de conducción; así como evitar tirar basura en la vía pública que pueda tapar el sistema de alcantarillado.
3. La implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), tales como: sistemas de infiltración (pozos o zanjas de infiltración, depósitos de infiltración), sistemas de captación y transporte (drenes filtrantes, cunetas verdes) y sistemas de tratamiento y almacenamiento (depósitos de detención, estanques de retención, humedales artificiales, entre otros) (Tarazona, 2021).

En las “subcuencas altas”, donde nacen el Río Chico (subcuenca 11), río San Lorenzo (subcuenca 13), río Ventoquipa (subcuenca 12) y río Camarones (subcuenca 10), se recomiendan las siguientes acciones:

1. En las áreas agrícolas de temporal, se sugiere la implementación del sistema lama-bordo (terrazas), el cual ayudará a reducir la velocidad del flujo de agua, favorecer el depósito de materiales en suspensión, la captura de carbono y el contenido de humedad en el suelo (Santiago *et al.*, 2018).

2. Sobre las corrientes principales, la colocación de estructuras disipadoras de energía, como vertedores con gaviones escalonados, podrían ayudar a disminuir el impacto hacia aguas abajo de un caudal de gran magnitud, así como los procesos erosivos. Tal como lo demuestran Ayala *et. al.*, (2020) en su estudio realizado sobre el río Fucha en Bogotá, donde compararon estructuras existentes vs la evaluación en un modelo a escala reducida de tres estructuras: vertedores en gaviones, un canal escalonado y un pozo de alcantarillado con caída hidráulica, estos dos últimos revestidos con neumáticos usados. En este estudio encontraron que la disipación de energía supera el 92%, y que los gaviones trabajaron de forma eficiente incluso bajo condiciones ahogadas.
3. La construcción de pequeños bordos de almacenamiento favorecería la retención, almacenamiento e infiltración del agua en zonas altas. Además, su captación puede servir para el riego de la producción forrajera (Loera *et. al.*, 2019) que, de acuerdo con el INEGI, se produce actualmente bajo condiciones de temporal. Sin embargo, dada su ubicación y densidad de concesiones asignadas en la zona, parece ser bajo riego.
4. Acciones de reforestación e implementación de sistemas agrosilvopastoriles, que mantienen la fertilidad del suelo y con ello su productividad. De esa forma, la producción animal puede prevalecer por más tiempo, en comparación con los sistemas agropecuarios actuales (Iglesias *et. al.*, 2011).

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

De los resultados se mostró que el modelo SWAT fue pertinente, dado que permitió la cuantificación y análisis espacio-temporal de los elementos del balance hidrológico de la cuenca Tulancingo, así como en los tres subperiodos de 12 años.

Las “cuencas altas” (11, 12 y 13) registraron láminas de precipitación media mensual superiores 2.2 veces, en promedio, al ser comparadas con las ocurridas en las “cuencas bajas” (5, 6, 7, 8, 9 y 10); situación que se reflejó también en los valores de cada elemento del balance y, en consecuencia, en la disponibilidad final de agua en el suelo. El escurrimiento superficial presentó valores máximos de julio a octubre, mientras que los mínimos ocurrieron de abril a mayo, independientemente de la subcuenca. Lo anterior asociado a la temporada de precipitación máxima, y la infiltración se observó influenciada por el tipo de suelo dominante en un 45.3% en la cuenca (principalmente compuesta por suelos de tipo Phaeozem).

Al cuantificar la lámina de disponibilidad de agua final en el suelo, se encontró que el Arroyo Ventoquipa (subcuenca 12) y el río San Lorenzo (subcuenca 13) donde (con una dominancia secuencial de agricultura y bosque), presentaron una oferta superior, con 143.9 y 139.5 mm, respectivamente, durante septiembre, y esta se redujo hasta valores de 13.2 y 25.2 mm durante mayo. Las corrientes de las subcuencas 5, 8 y 9 (donde se concentra la mayor parte de la población de la ciudad de Tulancingo) presentaron máximos en septiembre de 63.8, 45.6 y 40.6 mm y mínimos de 0.4, 1.1 y - 1.0 mm en abril, respectivamente.

Bajo el supuesto de que no se dispone de agua inicial en el suelo, se estimó déficit hídrico en ocho de los 12 meses del año, de octubre a mayo, por el contrario, la disponibilidad se observó de junio a septiembre.

Al analizar la evolución de los elementos del balance dividido en tres periodos: 1982-1993, 1994-2005 y 2006-2017 donde el Modelo Aditivo Generalizado presentó un buen ajuste en la mayoría de las variables ( $0.6 < R^2 < 0.94$ ); siendo en el periodo 2006-2017 donde se observaron valores superiores a los dos periodos previos. Así pues, al ver separadas sus bandas de intervalo de confianza del 95 %, indicaron un cambio en el estado hidrológico de la cuenca durante los últimos 12 años analizados; aspecto que se asoció al comportamiento de la precipitación y, en consecuencia, la tendencia del escurrimiento registrado en la estación hidrométrica Venados.

Finalmente, el conocimiento con mayor profundidad del comportamiento de los componentes del balance hidrológico de la cuenca, así como de su caracterización biofísica y de las actividades económicas principales, permitió realizar algunas recomendaciones de acciones que ayudarán a mejorar la disponibilidad y distribución del recurso agua dentro de la cuenca Tulancingo.

## CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES

Además de las recomendaciones particulares, como medidas para la conservación del recurso agua en la cuenca (apartado 8 del presente estudio), que de manera general incluyen la implementación de mejores prácticas de manejo y conservación en las “cuencas altas”, y la gestión sustentable y oportuna del recurso en “cuencas bajas”, con el fin de prevenir un escenario adverso, similar al de disponibilidad inicial de agua en el suelo nula (SW2).

Adicionalmente, dada la variación de la humedad del suelo, que se relaciona con el cambio climático, ya que su distribución espacial y temporal tiene implicaciones en la planificación y el desarrollo hidrológico, agrícola, económico y social (Gumindoga *et al.*, 2020). La respuesta del escurrimiento, con relación a la precipitación, durante los tres periodos analizados, es consistente con estudios de enfoque de cambio climático; como los de Swain *et al.* (2021) y Xuan *et al.*, (2021), donde los patrones de variación temporal del caudal son consecuencia a los cambios de precipitación. Por lo que se recomienda en próximos estudios, considerar escenarios de cambio climático a nivel de cuenca.

## CAPÍTULO 10. LITERATURA CITADA

- Achamyeleh G.M., Leon C. C. R. and Yali E. W. 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology:Regional Studies*. 25(2019, 100621):1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621>
- Alzati C.A.B., Rodríguez G.A.V. y Mendiola L.L. 2021. Reducción de la huella de escasez hídrica y medidas de conservación del agua en la vivienda. *Vivienda Comunidades Sustentables* 9:61-75. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i9.137>
- Aragón H.J.L., Aguilar M.G.A., Velázquez R.U., Jiménez M.M.R. y Maya F.A. 2019. Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. XX (2):1-15. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Arnold J.G., Kiniri J.R., Srinivasan R., Williams J.R. and Neitsch S.L. 2012. *Soil and Water Assessment Tool, Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute. USA. 649 p.
- Arnold J.G., Kiniri J.R., Moriasi D.N., Gassman, Abbaspour K.C., White M.J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R.D., van Griensven A., Van Liew M.W., Kannan N & Jha M.K. 2012b. *Swat: Model use, calibration, and validation*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 55(4):1491-1508.
- Ayala R.L.E., Franco R.A, Padilla G.E.A. 2020. Evaluación de la eficiencia en disipación de energía en estructuras hidráulicas construidas con gaviones y material reciclado (neumático usado) mediante modelamiento físico a escala reducida. *Revista UIS Ingenierías*. 19(1):143-154. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020014>
- Badiou, A. 1972. *El concepto de modelo. Bases para una epistemología materialista de las matemáticas*. Argentina. 1ª Edición. Editorial Siglo XXI. Traducción: Hugo Acevedo.143 p.
- Bao Z., Zhang J., Wang G., Chen Q., Guan T., Yan X., Liu J. y Wang J. 2019. The impact of climate variability and land use/cover change on the water balance in the Middle River Basin, China. *Journal of Hydrology*. 557(2019):1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123942>
- Barajas Z.M.A. y Fuentes G.M.L. 2017. Análisis de información de precipitación para zonas del estado de Guanajuato: San Francisco del Ricón, Purísima del Rincón y Manuel Doblado. Jóvenes en la ciencia. *Revista de divulgación científica*. 3(2):2470-2474.
- Bonasia, R., O.S. Areu-Rangel, D. Tolentino, I. Mendoza-Sánchez, J. González-Cao and J. Klapp. 2017. Flooding Hazard assessment at Tulancingo (Hidalgo, México). *Journal of Flood Risk Management*. 11(S2): S1116-S1124. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12312>

- Campos A.D.F. 2011. Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Capítulo 3: Estudio de la Precipitación. Pp 66-71. 1ª reimpresión. Edición del autor. San Luis Potosí, México. 2007. 333 pp.
- Can Ch. A., Ramírez, A.C., Ortega E. M., Trejo L. C. y Cruz D. J. 2008. Evaluación de la Relación de Adsorción de Sodio en las aguas del Río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*. 26(3): 243-252. México.
- CFSR. 2017. National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 08 Nov 2017. "The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>.
- Chanapathi T. y Thatikonda S. 2019. Investigating the impact of climate Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios. *Science of the Total Environment*. 721: 2-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137736>
- Chow V.T., Maidment D.R. y Mays L.W. 1994. Hidrología aplicada. McGraw Hill. 1ª Ed. Bogotá, Colombia. 584 p.
- DOF. 2020. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Diario Oficial de la Federación de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2022. Recuperado de: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/pdf/DMA\\_DOF\\_170920.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/pdf/DMA_DOF_170920.pdf)
- Dubos V., Hani I, Ouarda T.B.M.J., St-Hilaire A. 2022. Short-term forecasting of spring freshet peak flow with the Generalized Additive model. *Journal of Hydrology* 612 (Part A):5-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128089>
- García de M.E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Quinta edición: corregida y aumentada. ISBN 970-32-1010-4. 97 p.
- Guedes M. A., Assunção M.A., Lins A.C.W., Lima M.S.M.G and Fontes J.R.V.P. 2018. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. *Ambiente & Agua*. 13(6):1-19. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2204>
- Gumindoga W., Murwira A., Rwasoka D. T., Jahure F. B. & Chikwiramakomo L. 2020. The spatio-temporal soil moisture variation along the major tributaries of Zambezi River in the Mbire District, Zimbabwe. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 32(100753):1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100753>
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 111(2):113-124.

- Healy, R.W., Winter, T.C., LaBaugh, J.W., and Franke, O.L. 2007. Water budgets: Foundations for effective water-resources and environmental management: U.S. Geological Survey Circular 1308, 90 p. [en línea] [https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1308/pdf/C1308\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1308/pdf/C1308_508.pdf)
- Herrera, E., V. Magaña y S. Morett. 2018. Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova Scientia*. 10(21): 1-19. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527>
- Hu H., Yang K., Sharma A. y Mehrotra R. 2020. Assessment of water and energy scarcity, security and sustainability into the future for Three Gorges Reservoir using an ensemble of RCMs. *Journal of Hydrology*. 586(2020):1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124893>
- Hurtado P.J. y Yañez B.D.B. 2014. Aplicación del modelo Hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del Río Las Adjuntas. *Revista Geoespacial*. 12(2015):106-122.
- Iglesias J.M., Funes M.F., Toral O.C., Simón L., & Milera M. 2011. Diseños agrosilvopastoriles en el contexto de desarrollo de una ganadería sustentable. *Apuntes para el conocimiento. Pastos y Forrajes*. 34(3): 241-257.
- INEGI. 2017. Guía para la Interpretación de Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Escala 1:250000, serie VI. México. 204 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. Mapas. Edapológicos. A escala 1:250,000. Serie II. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/edapologia/#Descargas>. (Recuperado: marzo 2019).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). s/a. Mapas. Uso de suelo y vegetación. A escala 1:250,000. Serie II, Serie 2.5, Serie III, Serie IV, serie V, serie VI y serie 6.5. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>. (Recuperado: marzo 2019).
- IUSS Working Group WRB. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. FAO, Roma. 218 p.
- Kisiel C. C. 1969. Time series analysis of hydrologic data. *Advances in Hydrosience*. 5:1-119. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50007-6>
- Kuti, I. A., & Ewemoje, T. A. 2021. Modelling of sediment yield using the soil and water assessment tool (SWAT) model: A case study of the Chanchaga Watersheds, Nigeria. *Scientific African*. 13(e00936):1-11. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00936>
- Loera A.L.A., Torres A.M., Martínez M.J.F., Cisneros A.R., & Martínez H.J. de J. 2019. Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 6(17):283-295. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1867>
- Marín M., Clinciu I., Constantin T. N., Unfurean C., Adorjani A., Mihalache A.L., Agafia D. A., Octavian D.S., Dinca L., and Cacovean H. 2020. Assessing the vulnerability of water

- resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*. 184:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>
- Mendoza CM, Bautista OAL, Quevedo NA, Mendoza CD. 2018. Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático. *Hidrobiológica* 28(1):17-30.
- Mengistu, A G, Van Rensburg L D, Woyessa YE. 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 25(100621):1-18. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100621.
- Mendoza dos S. F., Proença de O.R., & Mauad, F. F. 2020. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 29(100685):1-22. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100685>
- Mesa Y.M. y Villa O.J.A. 2011. Modelación Matemática en la Historia de las Matemáticas. Una mirada al concepto de función Cuadrática. XIII CIAEM-IACME. Comité Interamericano de Educación Matemática. DOI: 10.13140/RG.2.1.3942.0568
- Molnar P. 2011. Calibration. *Watershed modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. In *The state and movement of water in living organisms*. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.
- Monterroso R.A.I. y Gómez D.J.D. 2021 Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*. 39(e774): 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniri J.R. and Williams J.R. 2011. *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute. USA. 618 p.
- Ouarda T.B.M.J., Charron C., Hundedcha Y., St-Hilaire A., Chebana F. 2018. Introduction of the GAM model for regional low-flow frequency analysis at ungauged basins and comparison with commonly used approaches. *Environmental Modelling & Software*. 109:256-271. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.031>
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81- 92.
- Pérez V.Z.R., Ángeles P.G., Chávez V.B., Valdez L.J.R., Ramírez G.M.E. 2021. Enfoque espacial para modelación de carbono en el mantillo de bosques bajo manejo forestal maderable. *Madera y bosques*. 27(1). <https://www.redalyc.org/journal/617/61766374013/>. (Recuperado: junio 2022).

- Qiao L., Zou Ch.B., Will R.E. and Stebler E. 2015. Calibration of SWAT model for woody plant encroachment using paired experimental watershed data. *Journal of Hydrology*. 523(2015):231-239. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.056>
- OMM. 2012. *Glosario Internacional de Hidrología*. Organización Meteorológica Mundial. WMO-No.385. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). ISBN 978-92-3-001154-3. Recuperado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>
- Ortiz GR, González CJM, Chávez MJ. 2015. Modelo de asignación de agua considerando un caudal ambiental mínimo en la cuenca del río Metztlán en Hidalgo, México. *Agrociencia* 49(7):703-721.
- Puskás, I., & Farsang, A. 2009. Diagnostic indicators for characterizing urban soils of Szeged, Hungary. *Geoderma*, 148(3):267-281. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.014>
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (Recuperado: mayo 2022).
- REPDA. 2018. Registro Público de Derechos de Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-55190>
- Reta S.D.G., Figueroa V.U., Faz C.R., Nuñez H.G. Gaytán M.A., Serrato C.S. y Payán G.J.A. 2010. Sistemas de producción de forraje para incrementar la productividad del agua. *Revista fitotecnia mexicana*. 33(4):83-87. Nota científica.
- Reta S.D.G., Figueroa V.U., Serrato C.J.S., Quiroga G.H.M., Gaytán M.A., Cueto W.J.A. 2015. Potencial forrajero y productividad del agua en patrones de cultivos alternativos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 2015;6(2):153-170.
- Rodríguez O.L.T., Verde V.D.A., Hernández G.F.J., Castrellón M.J.L., Rodríguez O.A. 2021. Producción forrajera y semillas de *Panicum virgatum*, *Tripsacum dactyloides* y *Sporobolus airoides* en Tulancingo, Hidalgo: Forraje y semilla de pastos nativos. *Ecosistemas Recursos Agropecuarios*. 8(II):1-12. <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2861>
- Ruíz O.M., Andrade C.J., Cortés H.J, Ortega S.C., Viguera P.M. y Ponce C. J. 2021. Caracterización de unidades de producción lechera en el Valle de Tulancingo, Hidalgo, México. *Abanico Agroforestal*. 3:1-15. <http://dx.doi.org/10.37114/abaagrof/2021.4>
- Santiago M.B.E., Martínez M.M.R., Rubio G.E., Vaquera H.H., Sánchez E.J. 2018. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 15(2):275-288.
- Schneider P., Ole S.B., Wassmann R. and Asch F. 2019. Potential and versatility of WEAP model (Water Evaluation and Planning System) for hydrological assessments of AWD (Alternate Wetting and Drying) in irrigated rice. *Agricultural Water Management*. 224(2019): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.030>

- Seiller G., Roy R. and Anctil F. 2017. Influence of three common calibration metrics on the diagnosis of climate change impacts on water resources. *Journal of Hydrology*. 547(2017):280-295. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.004>
- Shawul A.A., Chakma S. and Melesse A. M. 2019. The response of water balance components to land cover change based on hydrologic modeling and partial least squares regression (PLSR) analysis in the Upper Awash Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 26: 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100640>
- Singh V.P. y Woolhiser D.A. 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. American Society of Civil Engineers. *Journal of Hydrologic Engineering*. 7(4):270-292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270))
- Soilmoisture. 2012. Instrucciones de operación: Permeámetro de Guelph modelo 2800k1. Soilmoisture Equipment Corp. California USA. 53 p. <https://www.soilmoisture.com/>
- Swain SS, Mishra A Chatterjee C, Sahoo B. 2021. Climate-changed versus land-use altered streamflow: A relative contribution assessment using three complementary approaches at a decadal time-spell. *Journal of Hydrology* 596(126064):1.-5. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126064>
- Takele, G.S., Gebre, G.S., Gebremariam, A.G. *et al.* 2022. Hydrological modeling in the Upper Blue Nile basin using soil and water analysis tool (SWAT). *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 277–292. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01085-9>
- Tan M.L., Gassman P.W., Yang X. y Haywood J. 2020. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in water resources*. 143(103662): 1-52. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Tan M.L. and Yang X. 2020. Effect of rainfall station density, distribution and missing values on outputs in tropical region. *Journal of Hydrology*. 584 (2020): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124660>
- Tarazona T.L., Bonilla G.C.A., Rojas S.J.P. 2021. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) una alternativa integral para el manejo de las aguas lluvias. *Mundo FESC*. 11(21):140-155. Recuperado de: <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/628>
- Texas A&M University and US. Bureau of Reclamation. (2015). Hydrologic Modeling Inventory Website. Sitio Web administrado por Vijay P. Singh y Duncan Kikoyo. College Station, TX. USA. Consultado el 28-08-2020 en: <https://hydrologicmodels.tamu.edu/inventory/hydrology/>
- Toro T.A.M., Arteaga R.R., Vázquez P.M.A. e Ibáñez C.L.A. 2015. Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(3):577-588.
- Torres N.C.A. Malta C.N. y Arriagada V.R. 2019. Metodología para cuantificar costos de distribución de agua potable en zonas rurales. *Ingeniería Industrial*. XL(1):88-96

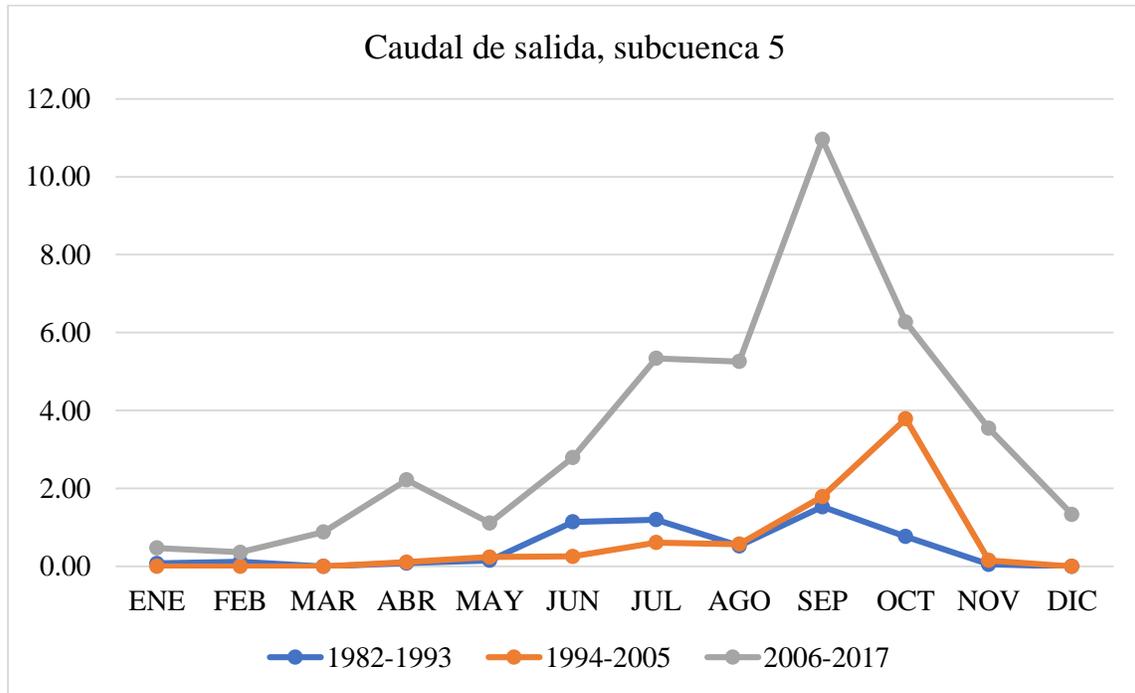
- Torres S.S.L., Tijerina Ch.L., Ibáñez C.L.A., Bautista H.M. 2020. Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 11(SPE24):153-163. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2366>
- UNESCO. 1981. Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura. París. Francia. 193 p.
- Valdéz L.J.R., Aguirre S.C.A. y Ángeles P.G. 2011. Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Metztlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 17(3):313-324.
- Vargas C.G., Ibáñez C.L.A. y Arteaga R.R. 2015. Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia-escurrimiento. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 7 (1): 5-21. DOI: 10.5154/r.inagbi.2015.03.002
- Wang Q., Xu Y., Wang Y., Zhang Y., Xiang J., Xu Y. and Wang J. 2020. Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*. 236: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104805>
- WEAP. 2020. ¿Por qué WEAP?. Stockholm Environment Institute (SEI). Software administrado por Jack Sieber, del Instituto Ambiental de Estocolmo, en Suecia. Consultado el 27-08-2020 en: <https://www.weap21.org/index.asp?action=201>
- Xu, C.Y. 2002. Hydrologic models. Department of Earth Sciences, Uppsala University. Sweden. 168 p.
- Xuan W, Xu YP, Fu Q, Booij MJ, Zhang X, Pan S. 2021. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China. *Journal of Hydrology* 597(125761): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125761>
- Yang, A. 2016. Hydraulic Transient Modeling: The Importance of Calibration. *Journal - American Water Works Association*. 108: 56–62. <https://doi.org/10.1002/awwa.1269>
- Yang W, Long D, Bai P. 2019. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China. *Journal of Hydrology* 570: 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.055>
- Zhang CH., Chu J. y Fu G. 2013. Sobol''s Sensitivity Analysis for a Distributed Hydrological Model of Yichun River Basin, China. 480(2013): 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.005>

## ANEXOS

### Anexo 1. Caudales de entrada y salida por subcuenca

**Cuadro 19. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 5, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

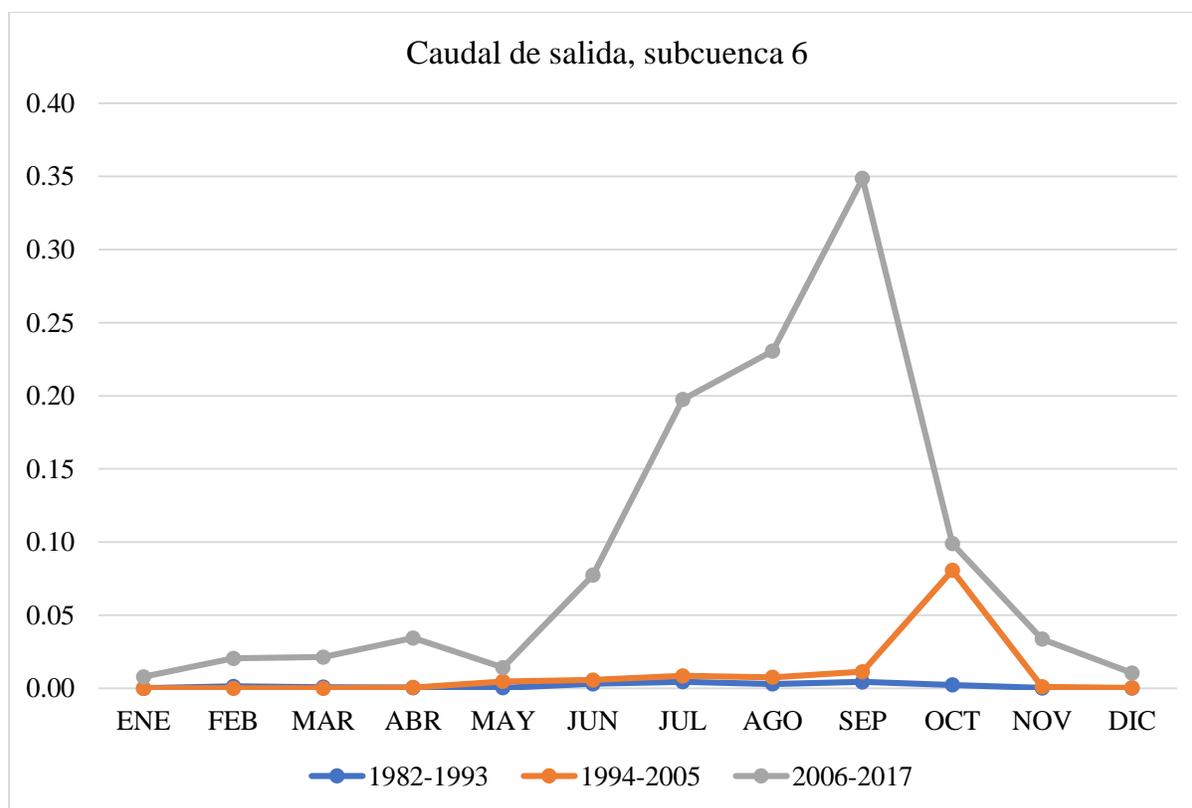
MES	FLUJO DE ENTRADA			FLUJO DE SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
ENE	0.100	0.015	0.555	0.077	0.000	0.472
FEB	0.134	0.011	0.456	0.119	0.000	0.363
MAR	0.021	0.014	0.974	0.002	0.000	0.882
ABR	0.123	0.151	2.306	0.086	0.109	2.221
MAY	0.205	0.282	1.192	0.155	0.243	1.114
JUN	1.231	0.309	2.891	1.143	0.258	2.796
JUL	1.215	0.651	5.404	1.201	0.611	5.340
AGO	0.562	0.635	5.335	0.525	0.572	5.259
SEP	1.577	1.843	11.035	1.529	1.792	10.958
OCT	0.769	3.806	6.288	0.767	3.790	6.274
NOV	0.083	0.187	3.603	0.055	0.157	3.544
DIC	0.017	0.019	1.425	0.001	0.000	1.336



**Figura A1.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 5 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

**Cuadro 20. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 6, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

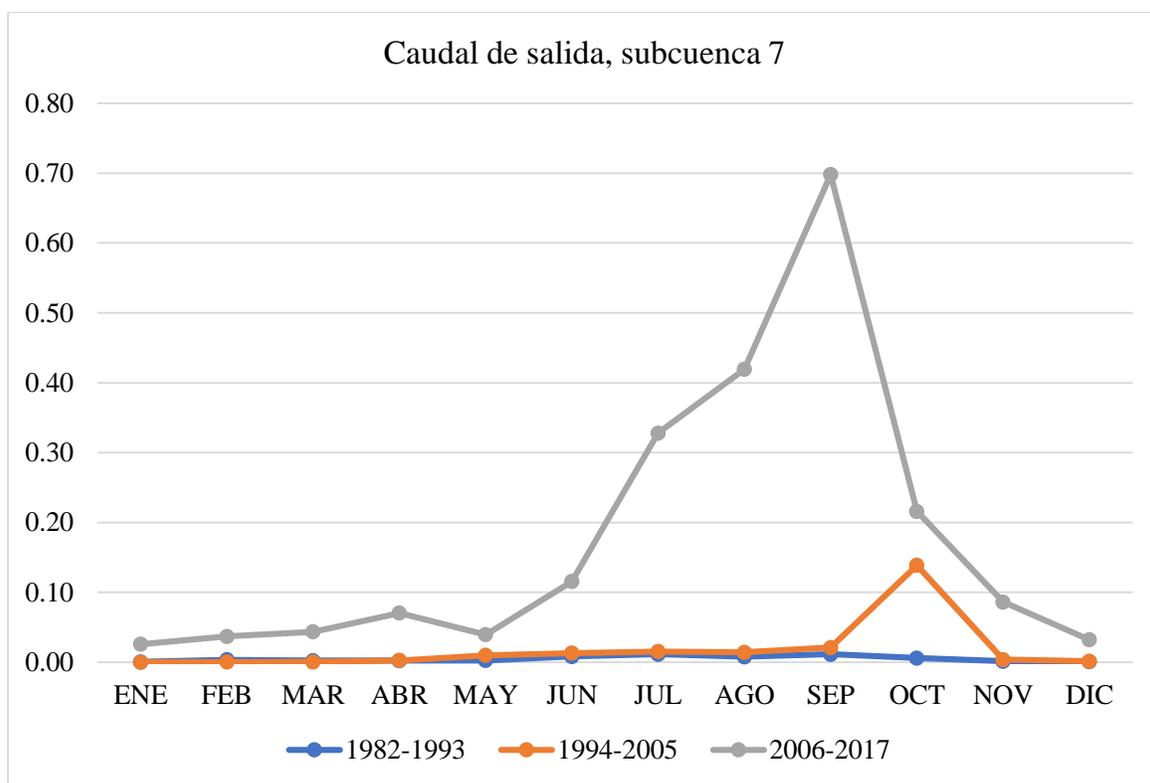
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
<b>ENE</b>	0.0006	0.0003	0.0169	2.5E-05	0.0E+00	7.8E-03
<b>FEB</b>	0.0025	0.0005	0.0290	1.3E-03	0.0E+00	2.0E-02
<b>MAR</b>	0.0018	0.0008	0.0305	7.3E-04	4.0E-05	2.1E-02
<b>ABR</b>	0.0018	0.0026	0.0433	4.0E-04	5.1E-04	3.4E-02
<b>MAY</b>	0.0026	0.0077	0.0240	2.9E-04	4.6E-03	1.4E-02
<b>JUN</b>	0.0034	0.0061	0.0868	3.0E-03	5.6E-03	7.7E-02
<b>JUL</b>	0.0046	0.0084	0.1895	4.4E-03	8.5E-03	2.0E-01
<b>AGO</b>	0.0030	0.0079	0.2318	2.9E-03	7.4E-03	2.3E-01
<b>SEP</b>	0.0046	0.0117	0.3565	4.4E-03	1.1E-02	3.5E-01
<b>OCT</b>	0.0024	0.0805	0.0915	2.3E-03	8.1E-02	9.9E-02
<b>NOV</b>	0.0012	0.0029	0.0434	1.9E-04	9.1E-04	3.4E-02
<b>DIC</b>	0.0007	0.0015	0.0196	1.5E-04	2.7E-04	1.0E-02



**Figura A2. Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 6 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

**Cuadro 21. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 7, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

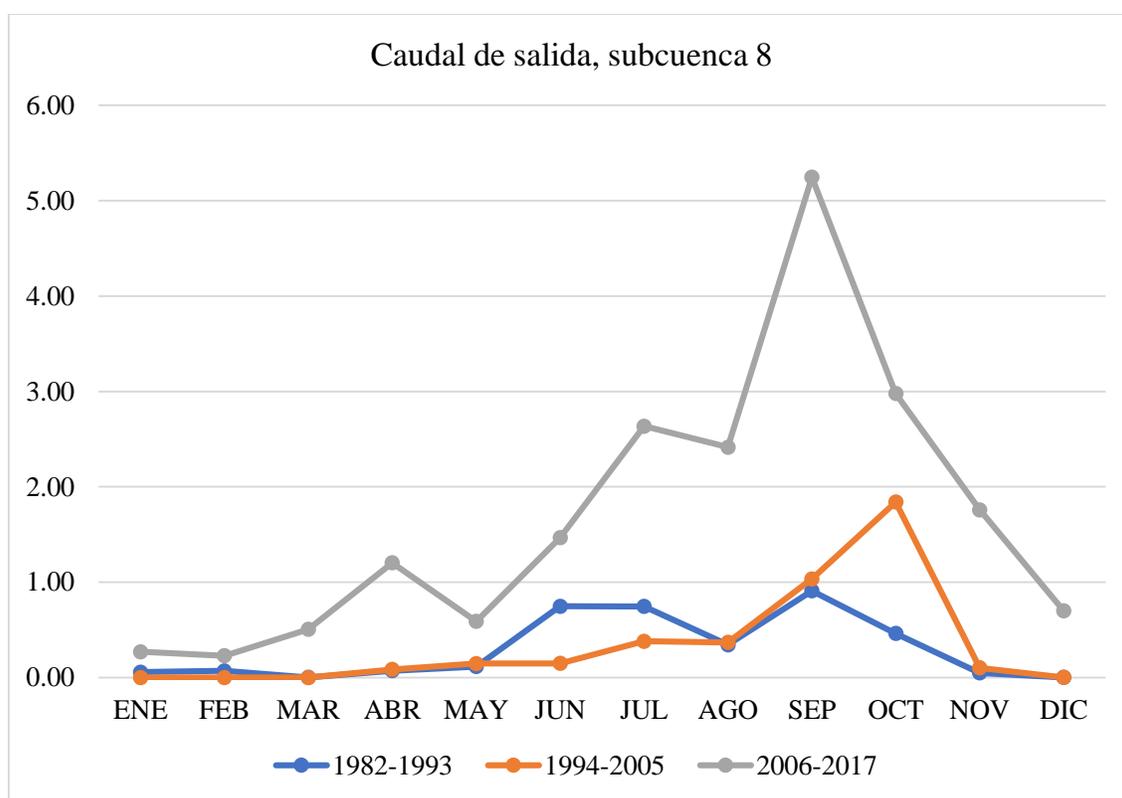
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
ENE	0.0016	0.0005	0.0362	0.0003	0.0000	0.0256
FEB	0.0055	0.0012	0.0466	0.0034	0.0002	0.0369
MAR	0.0042	0.0021	0.0555	0.0022	0.0003	0.0435
ABR	0.0047	0.0066	0.0814	0.0021	0.0025	0.0703
MAY	0.0072	0.0146	0.0513	0.0024	0.0097	0.0394
JUN	0.0091	0.0142	0.1330	0.0080	0.0130	0.1154
JUL	0.0122	0.0155	0.3146	0.0114	0.0152	0.3279
AGO	0.0081	0.0149	0.4221	0.0076	0.0139	0.4194
SEP	0.0120	0.0220	0.7173	0.0112	0.0210	0.6981
OCT	0.0062	0.1389	0.1979	0.0059	0.1388	0.2158
NOV	0.0033	0.0064	0.0955	0.0013	0.0035	0.0861
DIC	0.0019	0.0026	0.0429	0.0009	0.0012	0.0322



**Figura A3.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 7 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

**Cuadro 22. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 8, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

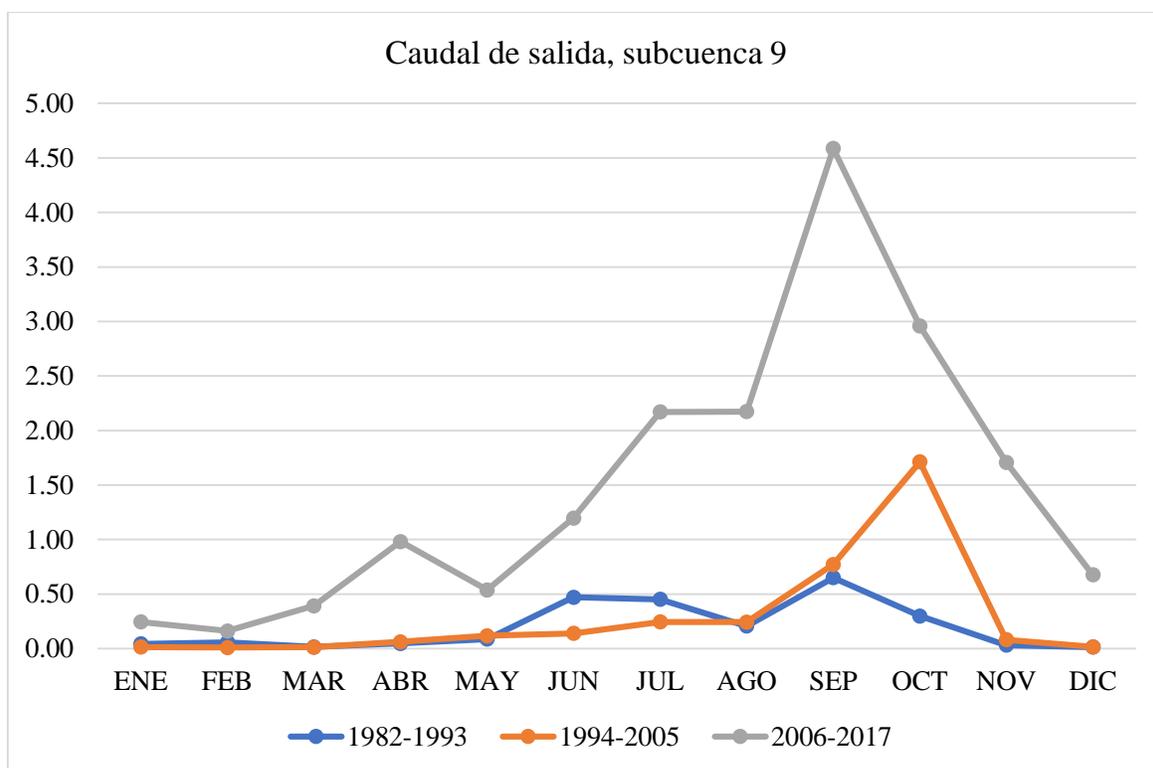
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
ENE	0.0585	0.0002	0.2667	0.0562	0.0002	0.2694
FEB	0.0677	0.0005	0.2269	0.0698	0.0004	0.2276
MAR	0.0016	0.0008	0.5054	0.0015	0.0006	0.5048
ABR	0.0728	0.0882	1.2050	0.0713	0.0850	1.2020
MAY	0.1156	0.1467	0.5945	0.1142	0.1471	0.5892
JUN	0.7615	0.1576	1.4764	0.7475	0.1478	1.4657
JUL	0.7421	0.3788	2.6414	0.7451	0.3804	2.6360
AGO	0.3425	0.3738	2.4231	0.3435	0.3682	2.4153
SEP	0.9213	1.0396	5.2556	0.9089	1.0344	5.2459
OCT	0.4487	1.8376	2.9773	0.4616	1.8400	2.9773
NOV	0.0453	0.0900	1.7549	0.0486	0.1011	1.7578
DIC	0.0013	0.0008	0.6947	0.0013	0.0009	0.6984



**Figura A4.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 8 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

**Cuadro 23. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 9, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

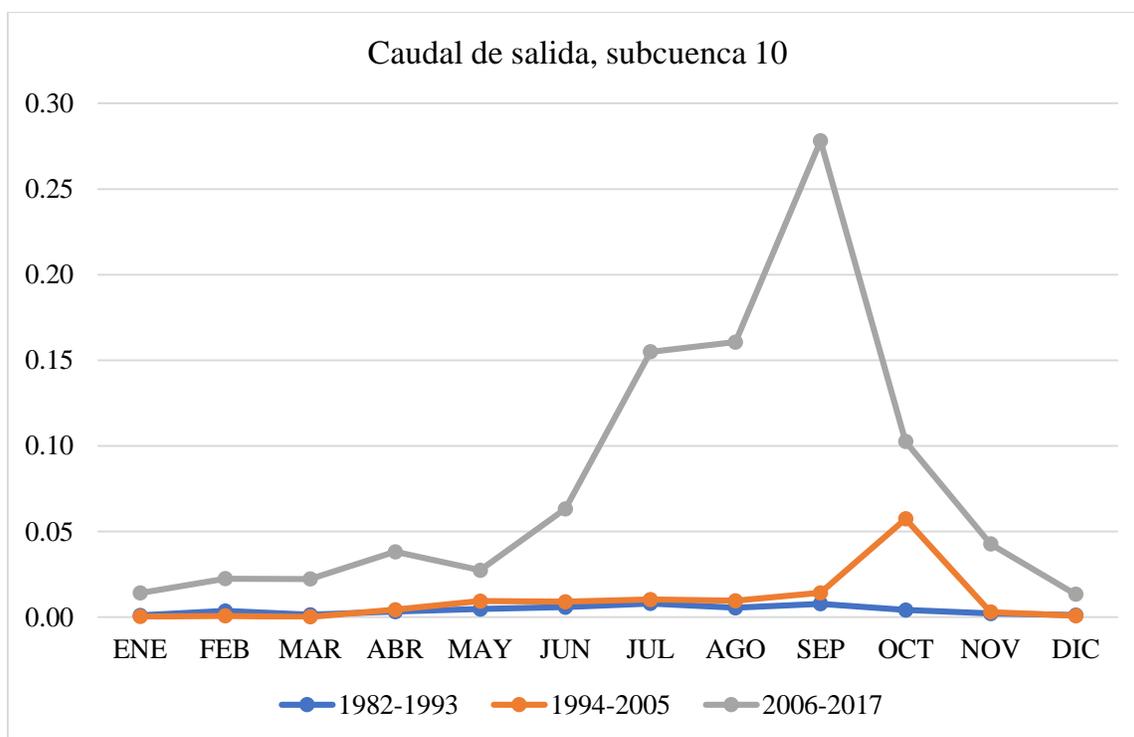
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
<b>ENE</b>	0.0585	0.0002	0.2667	0.0562	0.0002	0.2694
<b>FEB</b>	0.0677	0.0005	0.2269	0.0698	0.0004	0.2276
<b>MAR</b>	0.0016	0.0008	0.5054	0.0015	0.0006	0.5048
<b>ABR</b>	0.0728	0.0882	1.2050	0.0713	0.0850	1.2020
<b>MAY</b>	0.1156	0.1467	0.5945	0.1142	0.1471	0.5892
<b>JUN</b>	0.7615	0.1576	1.4764	0.7475	0.1478	1.4657
<b>JUL</b>	0.7421	0.3788	2.6414	0.7451	0.3804	2.6360
<b>AGO</b>	0.3425	0.3738	2.4231	0.3435	0.3682	2.4153
<b>SEP</b>	0.9213	1.0396	5.2556	0.9089	1.0344	5.2459
<b>OCT</b>	0.4487	1.8376	2.9773	0.4616	1.8400	2.9773
<b>NOV</b>	0.0453	0.0900	1.7549	0.0486	0.1011	1.7578
<b>DIC</b>	0.0013	0.0008	0.6947	0.0013	0.0009	0.6984



**Figura A5.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 9 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

**Cuadro 24. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 10, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

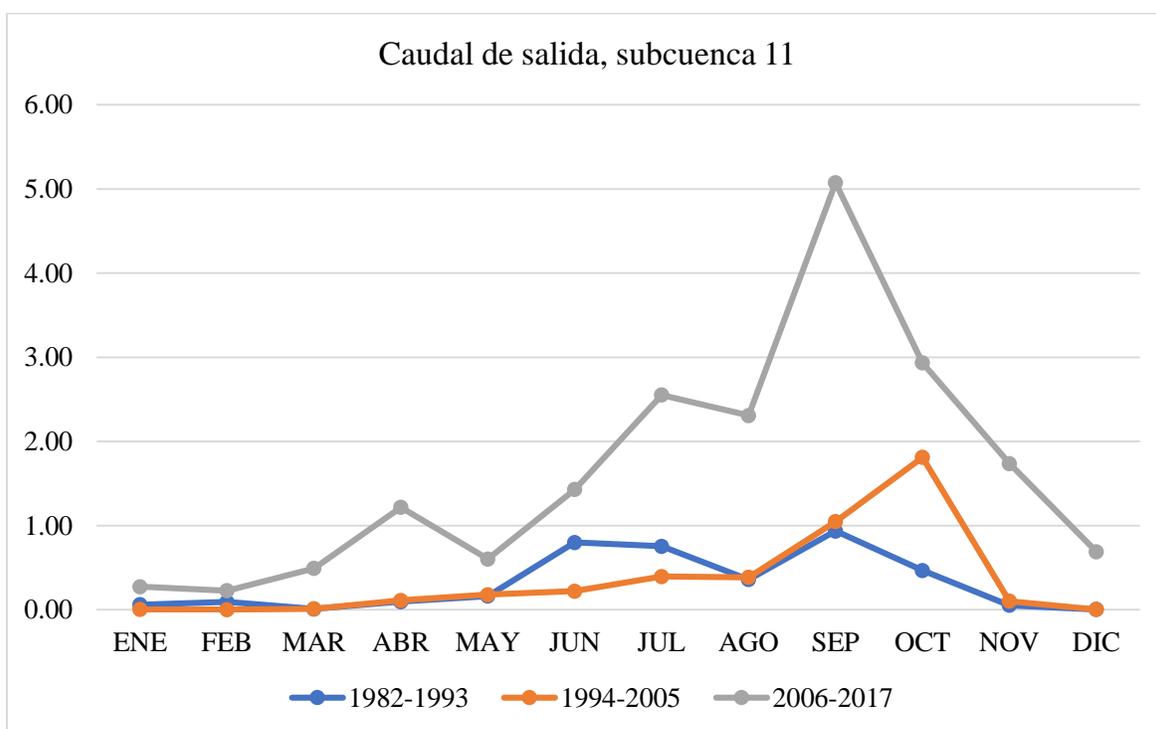
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
<b>ENE</b>	0.0010	0.0003	0.0141	0.0010	0.0003	0.0141
<b>FEB</b>	0.0036	0.0008	0.0223	0.0035	0.0007	0.0225
<b>MAR</b>	0.0028	0.0014	0.0304	0.0013	0.0001	0.0222
<b>ABR</b>	0.0030	0.0044	0.0382	0.0032	0.0043	0.0382
<b>MAY</b>	0.0049	0.0095	0.0273	0.0047	0.0094	0.0273
<b>JUN</b>	0.0061	0.0093	0.0668	0.0058	0.0090	0.0632
<b>JUL</b>	0.0080	0.0100	0.1523	0.0080	0.0103	0.1549
<b>AGO</b>	0.0052	0.0097	0.1617	0.0054	0.0095	0.1606
<b>SEP</b>	0.0079	0.0144	0.2815	0.0077	0.0141	0.2781
<b>OCT</b>	0.0039	0.0570	0.0987	0.0041	0.0573	0.1025
<b>NOV</b>	0.0021	0.0029	0.0413	0.0021	0.0030	0.0427
<b>DIC</b>	0.0012	0.0007	0.0132	0.0011	0.0007	0.0133



**Figura A6.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 10 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

**Cuadro 25. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 11, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

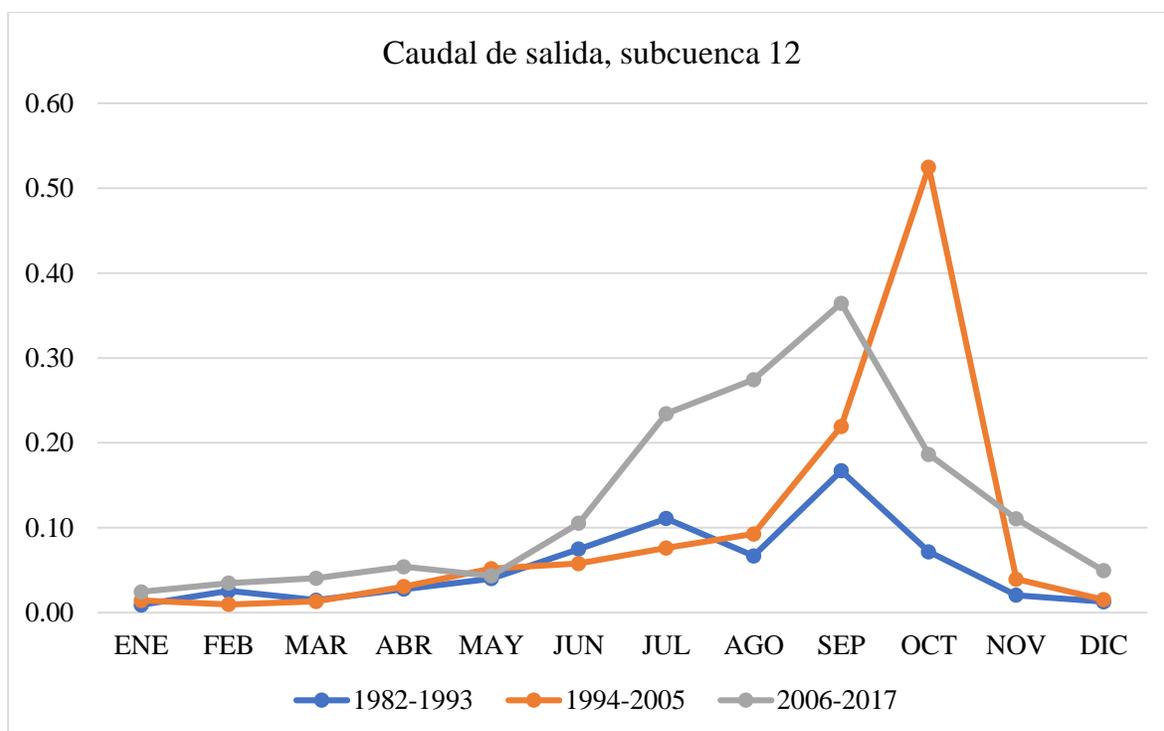
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
ENE	0.1070	0.0480	0.4302	0.0602	0.0028	0.2741
FEB	0.1505	0.0344	0.3795	0.0917	0.0004	0.2268
MAR	0.0743	0.0748	0.6450	0.0086	0.0104	0.4912
ABR	0.1769	0.1756	1.3482	0.0959	0.1109	1.2162
MAY	0.2452	0.2440	0.7010	0.1610	0.1786	0.6017
JUN	0.8960	0.2858	1.5279	0.7989	0.2201	1.4285
JUL	0.8067	0.4664	2.6407	0.7540	0.3947	2.5526
AGO	0.4250	0.4640	2.3835	0.3588	0.3858	2.3081
SEP	0.9833	1.0955	5.1554	0.9350	1.0470	5.0743
OCT	0.4923	1.8447	2.9603	0.4658	1.8107	2.9330
NOV	0.1223	0.1863	1.8450	0.0521	0.1012	1.7360
DIC	0.0501	0.0705	0.8388	0.0037	0.0025	0.6900



**Figura A7. Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 11 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

**Cuadro 26. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 12, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

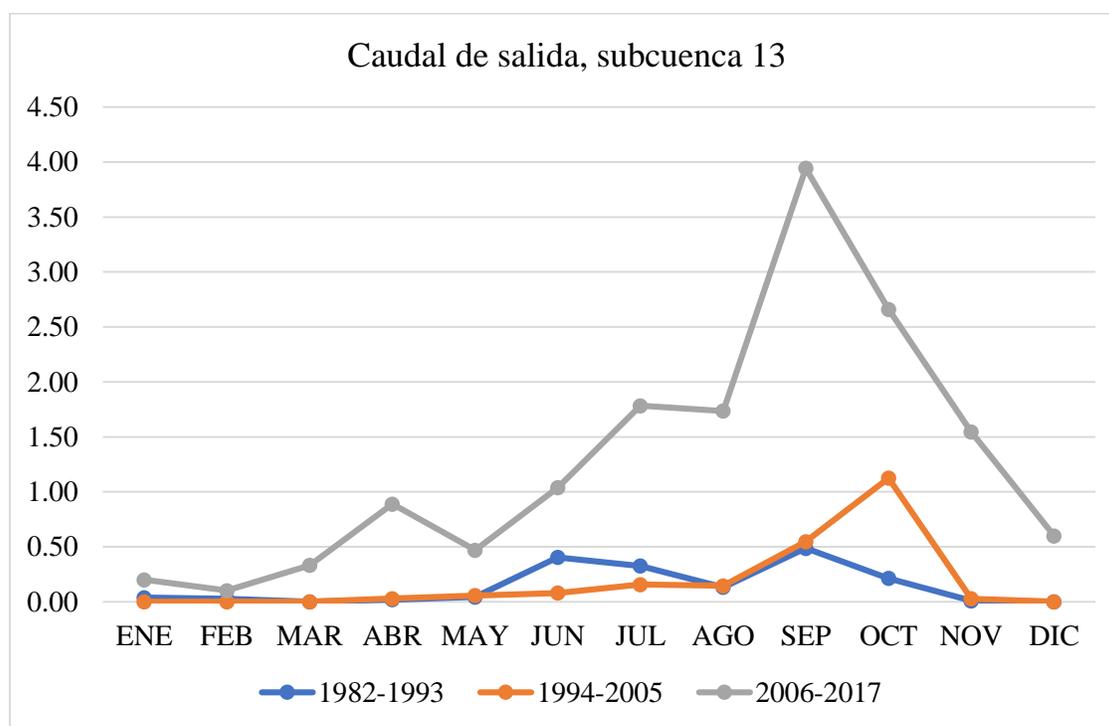
MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
ENE	0.0100	0.0138	0.0240	0.0089	0.0142	0.0244
FEB	0.0250	0.0094	0.0345	0.0256	0.0096	0.0346
MAR	0.0146	0.0138	0.0419	0.0146	0.0131	0.0405
ABR	0.0280	0.0313	0.0546	0.0275	0.0305	0.0540
MAY	0.0403	0.0515	0.0427	0.0400	0.0518	0.0433
JUN	0.0774	0.0590	0.1079	0.0748	0.0577	0.1052
JUL	0.1099	0.0759	0.2344	0.1108	0.0761	0.2344
AGO	0.0663	0.0939	0.2750	0.0668	0.0927	0.2745
SEP	0.1694	0.2217	0.3688	0.1671	0.2193	0.3644
OCT	0.0684	0.5225	0.1838	0.0717	0.5249	0.1863
NOV	0.0202	0.0373	0.1070	0.0205	0.0394	0.1103
DIC	0.0125	0.0155	0.0483	0.0128	0.0151	0.0492



**Figura A8.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 12 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

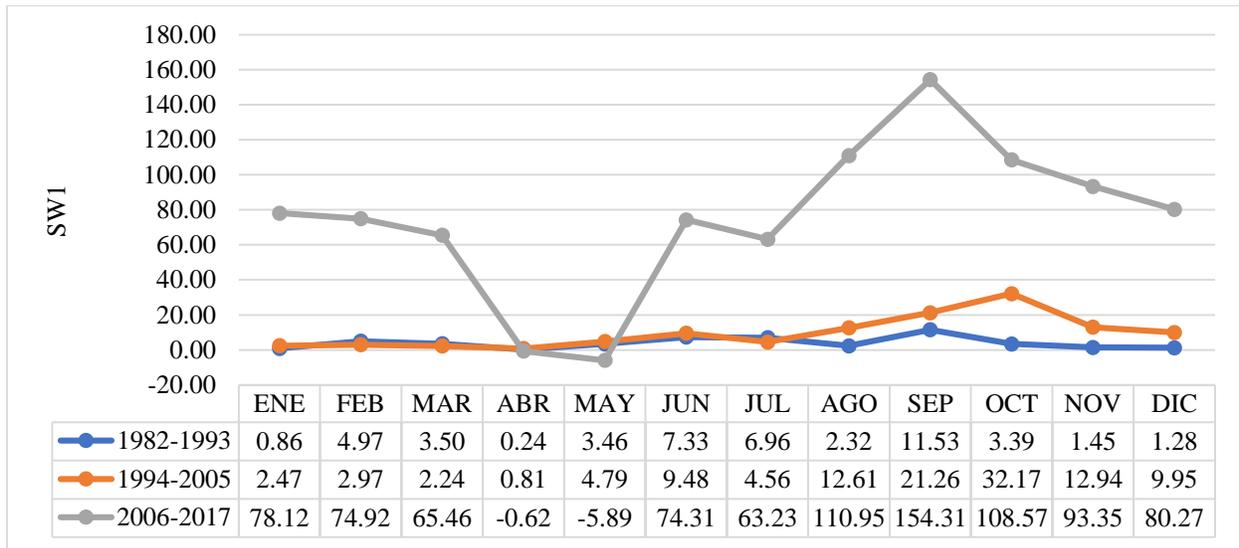
**Cuadro 27. Caudal de entrada y salida de la subcuenca 13, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.**

MES	ENTRADA			SALIDA		
	1982-1993	1994-2005	2006-2017	1982-1993	1994-2005	2006-2017
<b>ENE</b>	0.0799	0.0425	0.4338	0.0368	0.0000	0.1995
<b>FEB</b>	0.0890	0.0288	0.3082	0.0258	0.0000	0.1004
<b>MAR</b>	0.0499	0.0510	0.5028	0.0000	0.0000	0.3318
<b>ABR</b>	0.1044	0.1029	1.0618	0.0180	0.0288	0.8889
<b>MAY</b>	0.1403	0.1378	0.6037	0.0427	0.0557	0.4691
<b>JUN</b>	0.5299	0.1726	1.1903	0.4036	0.0792	1.0375
<b>JUL</b>	0.4414	0.2660	1.9276	0.3257	0.1555	1.7825
<b>AGO</b>	0.2431	0.2635	1.8815	0.1309	0.1445	1.7358
<b>SEP</b>	0.5714	0.6385	4.0786	0.4854	0.5462	3.9444
<b>OCT</b>	0.2870	1.2125	2.7463	0.2118	1.1240	2.6605
<b>NOV</b>	0.0896	0.1553	1.7499	0.0076	0.0277	1.5438
<b>DIC</b>	0.0430	0.0729	0.8749	0.0000	0.0000	0.5993

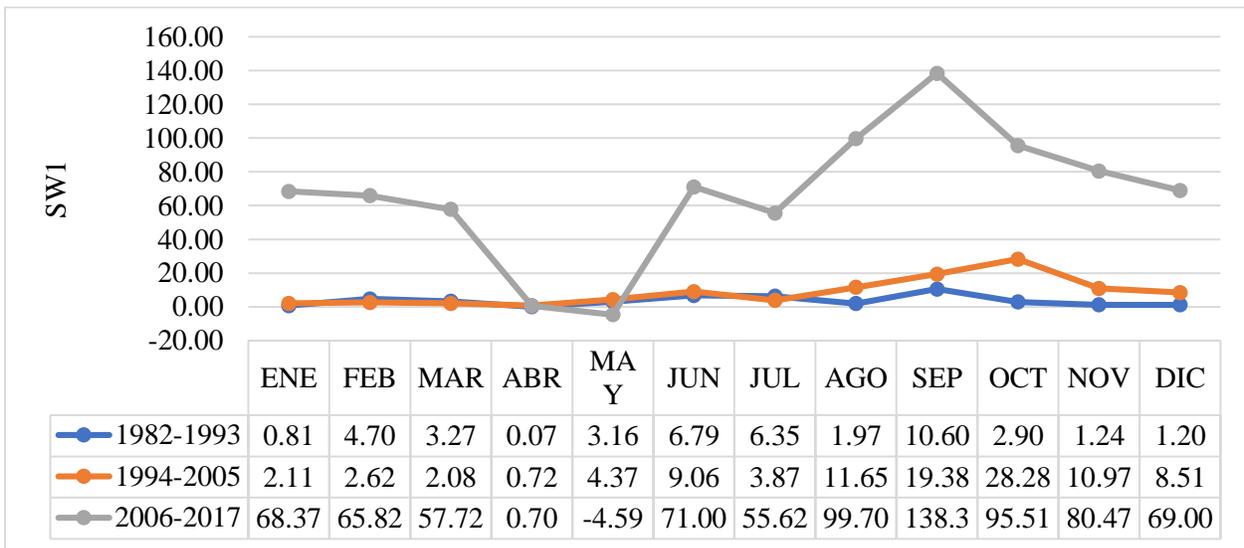


**Figura A9.** Caudal medio mensual de salida en la subcuenca 13 por subperiodo de tiempo, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

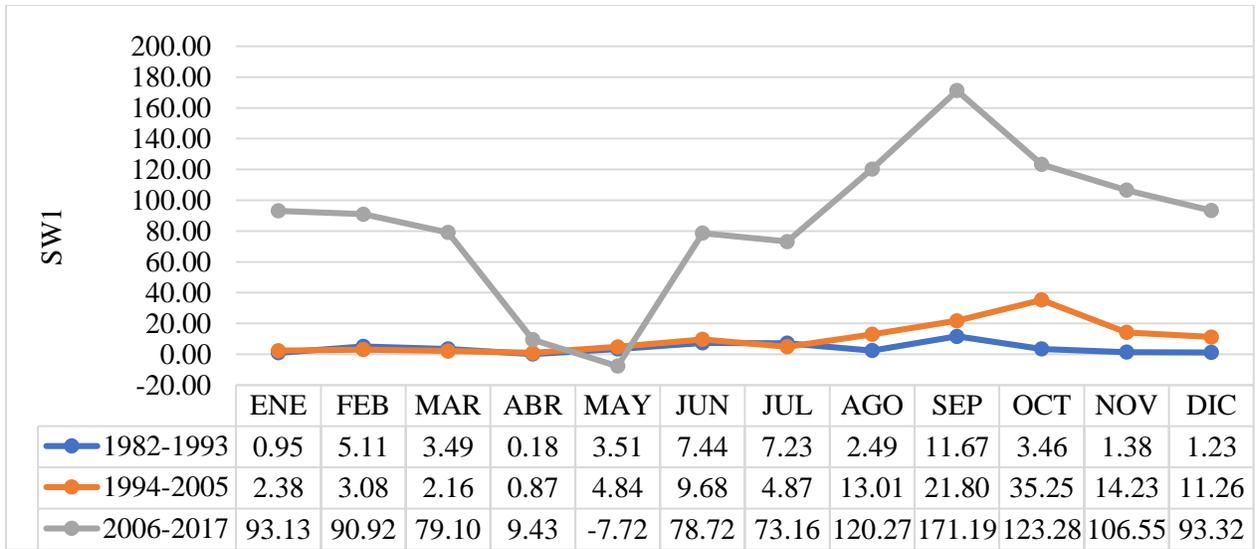
**Anexo 2. Disponibilidad mensual por subcuenca, SW1.**



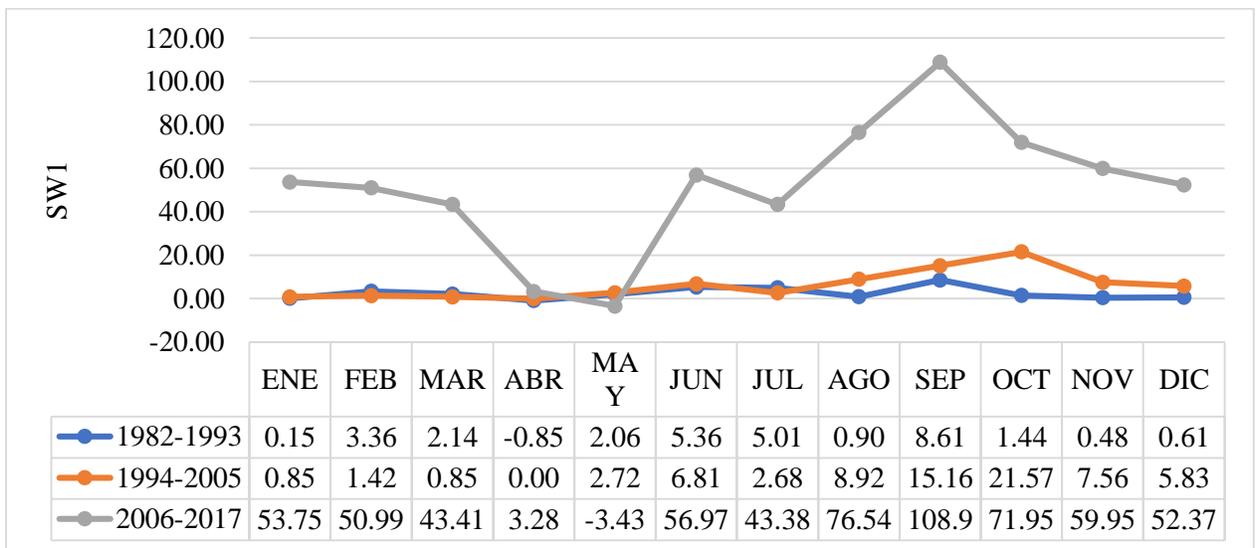
**Figura A10.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 5 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



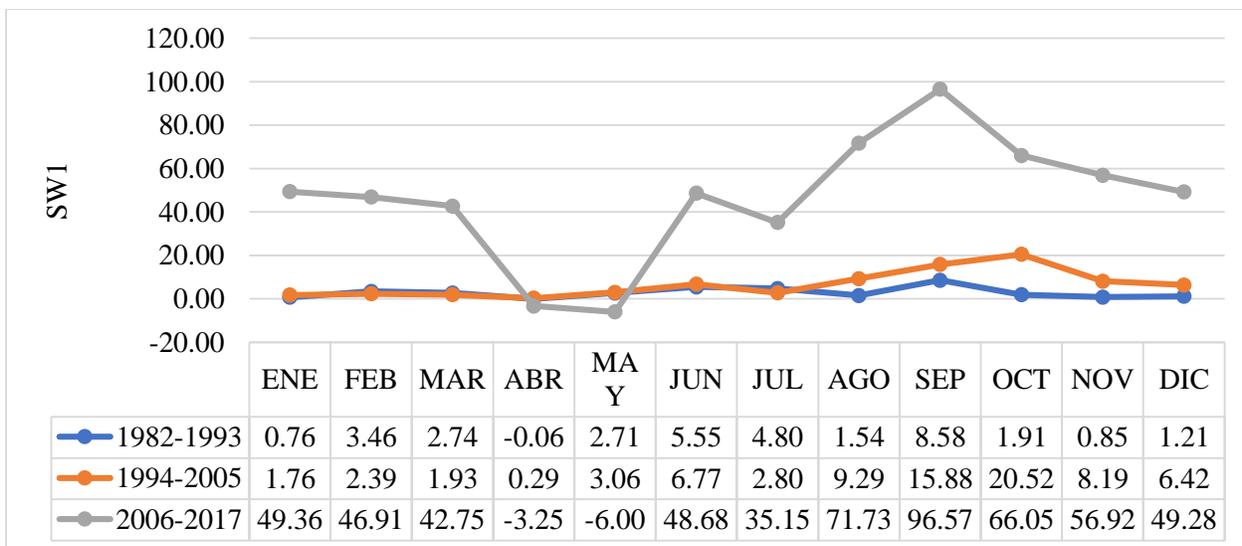
**Figura A11.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 6 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



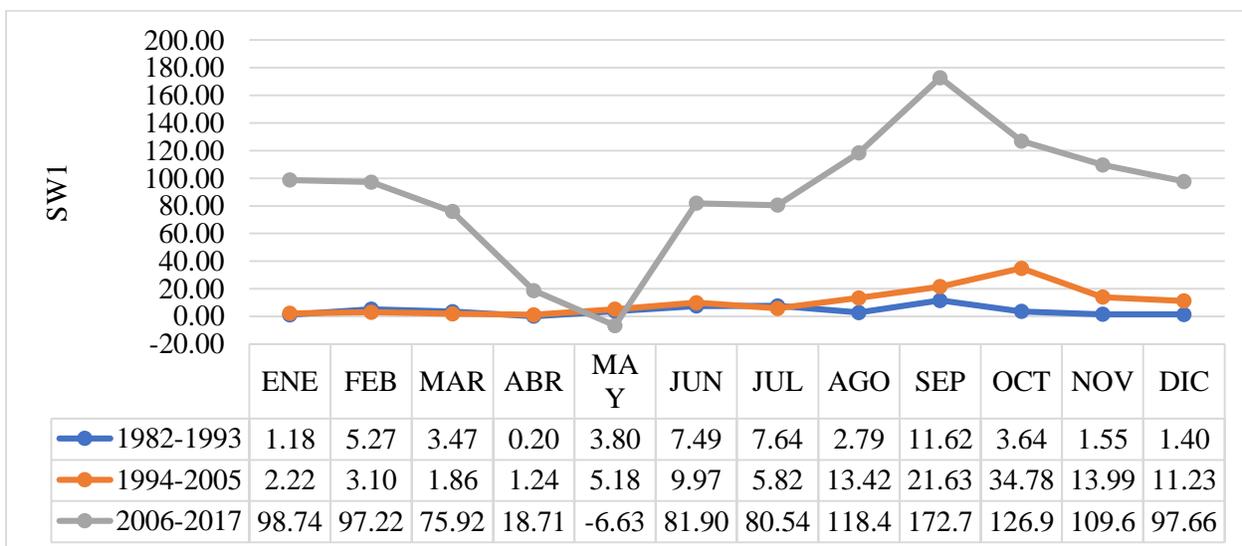
**Figura A12.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 7 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



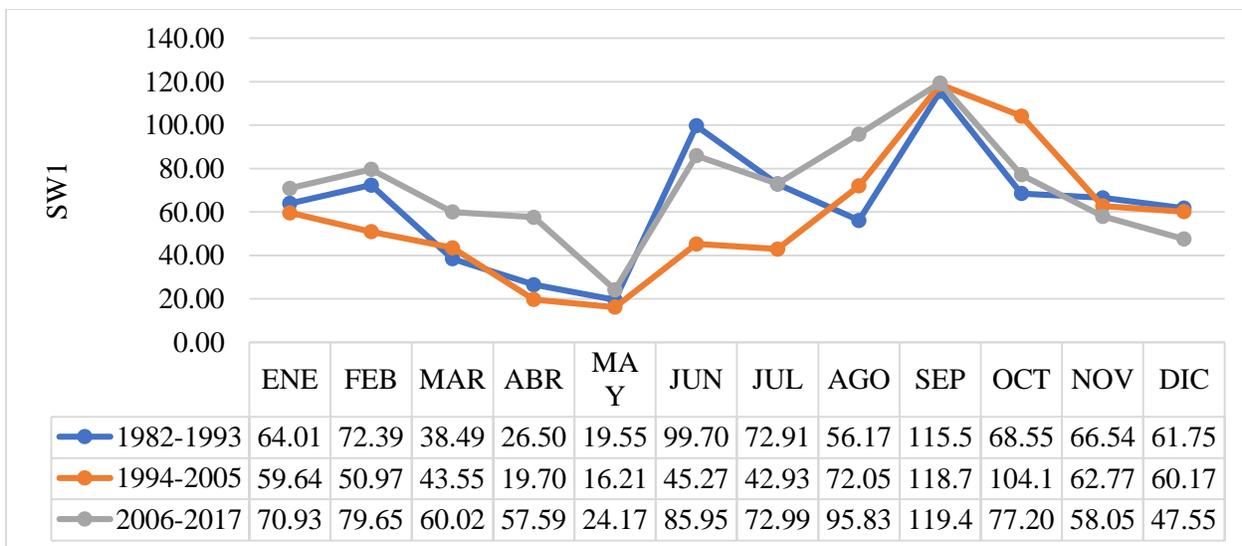
**Figura A13.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 8 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



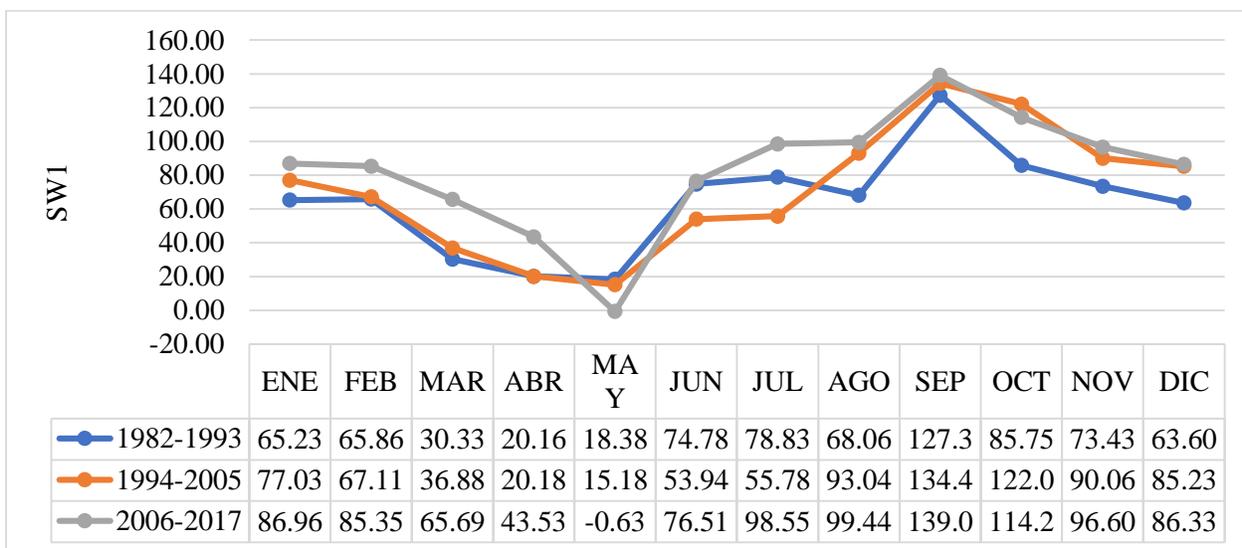
**Figura A14.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 9 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



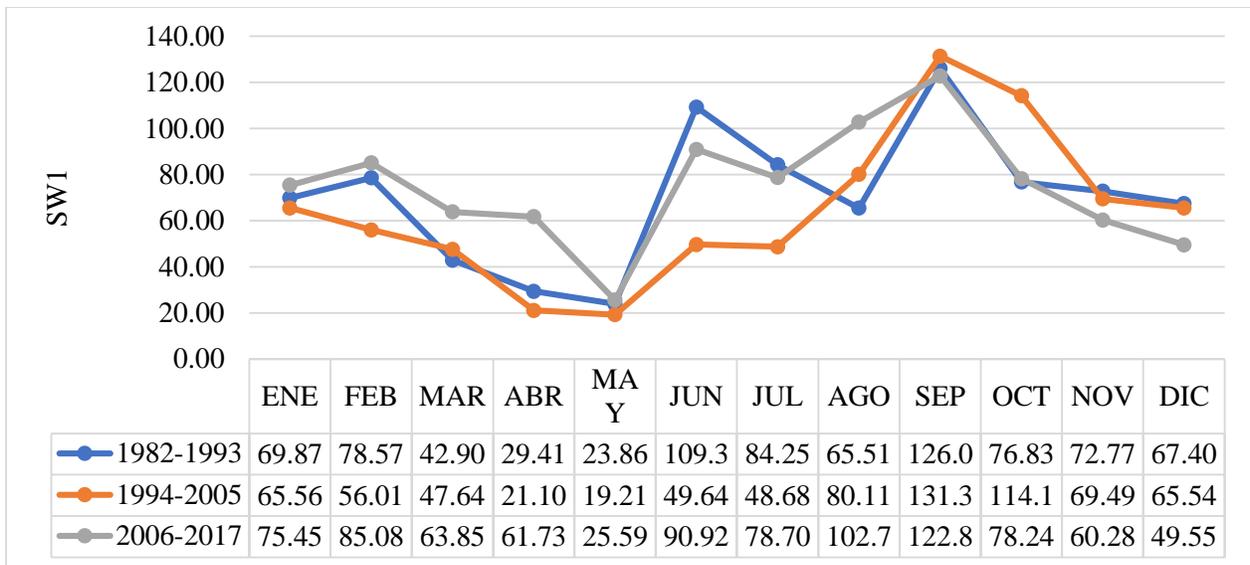
**Figura A15.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 10 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



**Figura A16.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 11 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



**Figura A17.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 12 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).



**Figura A18.** Disponibilidad media mensual de agua final en la subcuenca 13 (SW1), por subperiodo de tiempo (mm).