



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA
DEL RÍO YAUTEPEC, MORELOS, MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

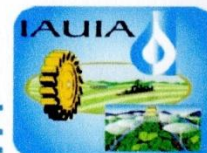
ING. JORGE JAIMES RODRÍGUEZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

DICIEMBRE DE 2016

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO.



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA
DEL RÍO YAUTEPEC, MORELOS, MÉXICO**

Tesis realizada por **Jorge Jaimes Rodríguez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

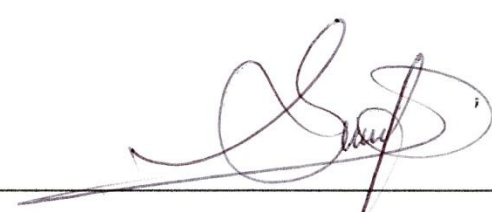
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR:



DR. SAMUEL PÉREZ NIETO

ASESOR:



DR. GUSTAVO ANTONIO ARÉVALO GALARZA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo mi **alma mater**, y en especial al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por otorgarme la oportunidad de estudiar y desarrollarme profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo otorgado durante la fase final de este proyecto.

A la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por su valiosa dirección y apoyo profesional basados en sus conocimientos y experiencias, durante el presente trabajo de investigación, sobre todo por la amistad que me fue otorgada.

Al Dr. Gustavo Antonio Arévalo Galarza, por su excelente disposición para colaborar en el desarrollo de esta investigación, siendo un pilar fundamental en la finalización de la misma.

Al Dr. Samuel Pérez Nieto, por el apoyo, observaciones y consejos brindados para el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. José María Bodoque del Pozo, por el apoyo brindado durante la estancia de investigación que realicé en España bajo su tutoría, por los buenos consejos, guía y amistad, que fueron parte importante en la culminación de la presente investigación.

DEDICATORIA

A mis padres Galdino y Rosalba, por su incondicional apoyo, amor y consejos, los cuales nunca me han abandonado y sé que estarán conmigo toda la vida.

A mis hermanos, gracias por el cariño brindado, mismo que nos une y es nuestra fortaleza.

A mis tíos y tías, gracias por su orientación y apoyo, que han formado parte de mi fortalecimiento como persona.

A todos mis familiares que directa o indirectamente han contribuido a mi crecimiento como individuo en la sociedad.

A todas mis amigas y amigos que he logrado crear durante todos estos años, gracias por su apoyo durante el tiempo que pasamos juntos dentro de esta casa de estudios.

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

Jorge Jaimes Rodríguez nace en el municipio de Tejupilco de Hidalgo, Estado de México, México el 23 de abril de 1991.

Realizó sus estudios de primaria en la escuela Justo Sierra y su educación secundaria en la escuela Narciso Mendoza, ambas de la localidad de Almoloya de las Granadas, Tejupilco, de donde es oriundo. Ingresó en el 2006 a la Universidad Autónoma Chapingo en donde culmina exitosamente sus estudios de nivel medio superior y posteriormente ingresa al Departamento de Suelos para estudiar la carrera de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la misma universidad, egresando en el año 2013 bajo el tema de tesis *"Caracterización de los recursos naturales de la comunidad de Almoloya de las Granadas, Tejupilco, Estado de México"*.

En agosto del 2014 ingresó al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la orientación de Uso Integral del Agua, bajo la dirección de la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo. Durante el periodo de maestría realizó una estancia de investigación bajo la asesoría del Dr. José María Bodoque del Pozo, en la Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica de la Universidad de Castilla - La Mancha, en Toledo, España.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO YAUTEPEC, MORELOS, MÉXICO

HYDROLOGIC MODELING OF THE YAUTEPEC RIVER BASIN, MORELOS, MÉXICO

Jorge **Jaimes Rodríguez**¹ y Laura Alicia **Ibáñez Castillo**²

RESUMEN

La cuenca del río Yautepec, Morelos, México sufre un fuerte proceso de urbanización y degradación de sus recursos naturales.

El objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para predecir la producción de escurrimientos mensual con el método de número de curva de escurrimiento.

Los datos utilizados para la calibración y validación fueron los medidos en la estación hidrométrica Ticumán correspondientes a las series mensuales de 2007 a 2011 y 1980 a 1985.

Para la calibración mensual de escurrimientos de 2002 a 2009, se obtuvo un NSE de 0.79 y R^2 de 0.81, obteniendo para el periodo de validación de 2011 un NSE de 0.89 y R^2 de 0.89.

Al implementarse en el periodo 1976 a 1985 se obtuvo un NSE para escurrimientos mensuales de 0.71 y R^2 de 0.72.

El modelo SWAT resultó ser un buen modelo para la estimación de los escurrimientos en la cuenca de estudio.

Palabras clave: SWAT, Modelación hidrológica, Número de curva, Escurrimientos.

ABSTRACT

The Yautepec river basin, Morelos, México is undergoing a strong process of urbanization and degradation of its natural resources.

The objective of this study was to calibrate and validate the SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) model to predict monthly runoff production using the runoff curve number method.

The data used for the calibration and validation were those measured in the Ticumán hydrometric station corresponding to the monthly series from 2007 to 2011 and from 1980 to 1985.

For the monthly calibration of runoff from 2002 to 2009, an NSE of 0.79 and R^2 of 0.81 were obtained, and for the 2011 validation period an NSE of 0.89 and R^2 of 0.89 were yielded.

When implemented in the period 1976 to 1985, an NSE for monthly runoff of 0.71 and R^2 of 0.72 were obtained.

The SWAT model turned out to be a good model for the estimation of runoff in the study basin.

Keywords: SWAT, Hydrologic modeling, Curve number, Runoff.

¹Tesista

²Director

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos particulares	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Definición de cuenca	4
3.2. Problemática de la cuenca del río Yautepec	5
3.2.1 Algunos estudios previos en la cuenca del río Yautepec	6
3.3. Proceso de simulación	7
3.4. Simulación hidrológica	8
3.5. Definición de modelo	8
3.6. El modelo SWAT	9
3.6.1. Algunos estudios del modelo SWAT	12
3.7. Hidrología SWAT	14
3.7.1. Intercepción vegetal	14
3.7.2. Infiltración	16
3.7.3. Redistribución	16
3.7.4. Evapotranspiración	17

3.7.4.1. Evapotranspiración potencial	18
3.7.5. Flujo lateral subterráneo.....	18
3.7.6. Escurrimiento superficial	18
3.7.7. Cuerpos de agua	18
3.7.8. Cauces	19
3.7.9. Pérdidas de transmisión.....	19
3.7.10. Flujo base	19
3.7.11. Agua subterránea.....	20
3.8. Cálculo de los volúmenes de escurrimiento superficial	21
3.8.1. Método de número de curva de escurrimiento en SWAT.....	21
3.8.1.1. Grupo hidrológico de los suelos.....	25
3.8.1.2. Condición de humedad antecedente del suelo.....	28
3.8.1.3. Parámetro de retención.....	29
3.8.1.4. Ajustes de pendiente	32
3.8.2. Método de Green & Ampt en SWAT.....	32
3.8.2.1. Parámetro de conductividad hidráulica efectiva	34
3.8.2.2. Parámetro de potencial mátrico.....	35
3.8.2.3. Cambio en el contenido de humedad	35
3.8.3. Comparación del método de número de curva (CN) y el de Green & Ampt.....	36
3.9. Erosión	36
3.9.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).....	37
3.9.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).....	38

3.9.3. Transporte de agua y sedimentos en el cauce principal	40
3.10. Análisis de sensibilidad del modelo	41
3.10.1. t-stat y p-valúe	42
3.11. Calibración del modelo	43
3.12. Evaluación del modelo	44
3.13. Validación del modelo	46
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
4.1. Descripción del área de estudio.....	48
4.1.1. Localización geográfica	48
4.1.2. Hidrografía	49
4.1.3. Fisiografía.....	50
4.1.4. Geología	50
4.1.5. Clima	53
4.1.6. Suelos	53
4.1.7. Uso del suelo y vegetación.....	56
4.1.8. Población.....	61
4.2. Materiales	63
4.2.1. Software	63
4.2.2. Bases de datos	63
4.2.3. Información topográfica.....	63
4.2.4. Información de uso del suelo y vegetación	63
4.2.5. Información edafológica	63

4.2.6. Información hidrométrica.....	64
4.3. Métodos.....	69
4.3.1. Recorrido de campo y muestreo de suelos.....	69
4.3.1.1. Sitio 1: Suelo Fluvisol.....	73
4.3.1.2. Sitio 2: Suelo Regosol.....	74
4.3.1.3. Sitio 3: Suelo Litosol.....	76
4.3.1.4. Sitio 4: Suelo Andosol.....	77
4.3.1.5. Sitio 5: Suelo Cambisol.....	79
4.3.1.6. Sitio 6: Suelo Vertisol.....	81
4.3.1.7. Sitio 7: Suelo Feozem.....	82
4.3.1.8. Sitio 8: Suelo Rendzina.....	84
4.3.2. Parámetros topográficos.....	85
4.3.2.1. Configuración de la cuenca.....	85
4.3.2.2. Pendiente.....	85
4.3.2.3. Unidades de respuesta hidrológica (HRU).....	87
4.3.3. Parámetros de uso del suelo y vegetación.....	88
4.3.4. Parámetros edafológicos.....	89
4.3.4.1. Preparación de muestras de suelo.....	89
4.3.4.2. Análisis de laboratorio.....	89
4.3.4.3. Factor de erodabilidad K.....	92
4.3.4.4. Albedo del suelo.....	93
4.3.4.5. Grupo hidrológico del perfil.....	94

4.3.4.6. Capacidad del agua disponible	94
4.3.4.7. Conductividad hidráulica y densidad aparente.....	94
4.3.5. Parámetros climáticos	95
4.3.5.1. Estaciones meteorológicas y datos faltantes	95
4.3.5.2. Estaciones meteorológicas convencionales.....	96
4.3.5.3. Estaciones meteorológicas automáticas	96
4.3.5.4. Probabilidades climáticas	96
4.3.5.5. Intensidad mensual de la lluvia en 30 minutos	99
4.3.5.6. Promedio mensual de la radiación solar.....	103
4.3.5.7. Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío	103
4.3.5.8. Promedio mensual de la velocidad del viento	103
4.3.5.9. Determinación de la evapotranspiración	104
4.3.6. Cuerpos de agua	104
4.3.7. Acuíferos	105
4.3.8. Uso del agua.....	111
4.3.8.1. Sector público - urbano	111
4.3.8.2. Sector agrícola.....	111
4.3.9. Transporte de agua y sedimentos	116
4.3.10. Subcuenca.....	118
4.3.11. Unidades de respuesta hidrológica (HRU).....	119
4.3.12. Parámetros generales de cuenca.....	120
4.3.13. Lineamientos de los procesos de cálculo	121

4.3.14. Proceso de calibración y análisis de sensibilidad e incertidumbre.....	122
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	125
5.1. Características de la cuenca.....	125
5.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo del periodo de simulación de escurrimientos 2002 a 2011 con número de curva.....	129
5.2.1. Etapa de calibración mensual 2002 a 2009 con número de curva	129
5.2.2. Etapa de simulación anual 2002 a 2009 con número de curva	134
5.2.3. Etapa de validación mensual 2011 con número de curva	136
5.3. Periodo de simulación de escurrimientos 1976 a 1985 con número de curva	138
5.3.1. Simulación mensual 1976 a 1985	139
5.3.2. Simulación anual 1976 a 1985	141
5.4. Comparación de la predicción de escurrimientos con número de curva vs Green & Ampt del periodo de simulación mensual 2008 a 2011	142
5.5. Periodo de simulación de sedimentos 1976 a 1985.....	144
5.5.1. Simulación mensual 1976 a 1985	145
5.5.2. Simulación anual 1976 a 1985	147
6. CONCLUSIONES.....	150
7. RECOMENDACIONES.....	152
8. LITERATURA CITADA	153
9. ANEXOS	168

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de CN para zonas urbanas.	23
Cuadro 2. Valores de CN para uso agrícola del suelo.....	24
Cuadro 3. Comparación del método de número de curva vs Green & Ampt.	36
Cuadro 4. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE).	46
Cuadro 5. Resumen de estadísticas de la revisión de literatura del NSE.	46
Cuadro 6. Tipos de rocas presentes en la cuenca de estudio.....	50
Cuadro 7. Tipos de climas presentes en la cuenca de estudio.....	53
Cuadro 8. Tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio.	53
Cuadro 9. Uso de suelo y vegetación de la serie I de INEGI, presentes en la cuenca de estudio.	56
Cuadro 10. Uso del suelo y vegetación de la serie IV de INEGI presentes en la cuenca de estudio.	56
Cuadro 11. Comparación de los usos del suelo de las series I, IV de INEGI.	59
Cuadro 12. Municipios presentes en la cuenca de estudio y población.	61
Cuadro 13. Información de escurrimientos y sedimentos de la estación 18223 "Ticumán" de los años 1980 a 1985.	65
Cuadro 14. Información de escurrimientos y sedimentos de la estación 18223 "Ticumán" de los años 2006 a 2011.	67
Cuadro 15. Localización del sitio uno de muestreo.	73
Cuadro 16. Características en campo del perfil de suelo, del sitio uno de muestreo.	73
Cuadro 17. Localización del sitio dos de muestreo.....	74
Cuadro 18. Características en campo del perfil de suelo, del sitio dos de muestreo.....	75

Cuadro 19. Localización del sitio tres de muestreo.	76
Cuadro 20. Características en campo del perfil de suelo, del sitio tres de muestreo.	76
Cuadro 21. Localización del sitio cuatro de muestreo.	77
Cuadro 22. Características en campo del perfil de suelo, del sitio cuatro de muestreo. ..	77
Cuadro 23. Localización del sitio cinco de muestreo.....	79
Cuadro 24. Características en campo del perfil de suelo, del sitio cinco de muestreo. ...	79
Cuadro 25. Localización del sexto sitio de muestreo.....	81
Cuadro 26. Características en campo del perfil de suelo, del sitio seis de muestreo.	81
Cuadro 27. Localización del séptimo sitio de muestreo.....	82
Cuadro 28. Características en campo del perfil de suelo, del sitio siete de muestreo.....	83
Cuadro 29. Localización del octavo sitio de muestreo.....	84
Cuadro 30. Características en campo del perfil de suelo, del sitio ocho de muestreo.	84
Cuadro 31. Rangos de pendiente utilizados en la modelación hidrológica.....	85
Cuadro 32. Reajuste del uso del suelo y vegetación en la cuenca de estudio con el criterio HRU.....	87
Cuadro 33. Reajuste de los tipos de suelo en la cuenca de estudio con el criterio HRU.	88
Cuadro 34. Reajuste de la pendiente en la cuenca de estudio con el criterio HRU.	88
Cuadro 35. Clasificación del uso del suelo y vegetación SWAT.....	88
Cuadro 36. Estaciones meteorológicas con datos útiles en la cuenca.	95
Cuadro 37. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas para el periodo 2008 a 2011.....	96
Cuadro 38. Estadísticas climáticas para la base de datos del modelo SWAT.....	99

Cuadro 39. Intensidad de la precipitación en 30 minutos (I_{30}) para estaciones representativas de la cuenca del periodo 1976 a 1988 en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	102
Cuadro 40. Intensidad de la precipitación en 30 minutos (I_{30}) para estaciones representativas de la cuenca del periodo 2002 a 2011 en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	103
Cuadro 41. Presas de almacenamiento presente en la cuenca de estudio.	104
Cuadro 42. Clasificación de presas de almacenamiento.	105
Cuadro 43. Acuíferos presentes en la cuenca de estudio.	105
Cuadro 44. Valores ingresados para el parámetro ALPHA_BF.	110
Cuadro 45. Parámetros hidrológicos requeridos en la variable de agua subterránea.	110
Cuadro 46. Volumen de extracción de agua para uso público - urbano.....	111
Cuadro 47. Volumen de extracción de agua para uso agrícola.	112
Cuadro 48. Resumen de la extracción de agua.....	112
Cuadro 49. Resumen de la extracción de agua subterránea en la cuenca de estudio reajustando la extracción de manantiales.	113
Cuadro 50. Datos de precipitación en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000	113
Cuadro 51. Datos de evaporación en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.	114
Cuadro 52. ETP promedio en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.	114
Cuadro 53. 0.5 ETP promedio en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.	114
Cuadro 54. Extracción diaria promedio durante el periodo 1976 a 1985.	116
Cuadro 55. Extracción diaria promedio durante el periodo 2002 a 2011.	116

Cuadro 56. Parámetros hidrológicos requeridos en la variable de transporte de agua y sedimentos en la cuenca.	117
Cuadro 57. Parámetros hidrológicos requeridos para la variable subcuenca (.Sub).	118
Cuadro 58. Parámetros hidrológicos ingresados para la variable HRU.	119
Cuadro 59. Parámetros hidrológicos ingresados de la variable .Bsn.	120
Cuadro 60. Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad durante el periodo 2002 a 2009 con la metodología de número de curva.....	123
Cuadro 61. Área y pendiente de las subcuencas presentes.	125
Cuadro 62. Parámetros morfológicos generales de la cuenca de estudio.....	125
Cuadro 63. Parámetros con influencia en el proceso de calibración de 2002 a 2009. ...	129
Cuadro 64. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel mensual de 2007 a 2009.	132
Cuadro 65. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel anual de 2007 a 2009.	134
Cuadro 66. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado de la etapa de validación mensual año 2011	136
Cuadro 67. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel mensual de 1980 a 1985.	139
Cuadro 68. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel anual de 1980 a 1985.	141
Cuadro 69. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado mensual con el método de Green & Ampt de 2009 a 2011.	143
Cuadro 70. Producción de sedimentos ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) medidos y simulados a nivel mensual de 1980 a 1985.	145
Cuadro 71. Producción de sedimentos ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) medidos y simulados a nivel anual de 1980 a 1985.	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la cuenca (Aparicio, 2001)..	4
Figura 2. Representación del balance hídrico SWAT (Neitsch <i>et al.</i> , 2011).	11
Figura 3. Esquema de las vías disponibles para el movimiento del agua en SWAT (Neitsch <i>et al.</i> , 2011).	15
Figura 4. Acuíferos confinados y no confinados (Dingman, 1994).	21
Figura 5. Comparación del contenido de humedad modelado por Green & Ampt vs típica distribución observada (Neitsch <i>et al.</i> , 2011).	33
Figura 6. Localización geográfica de la cuenca del río Yautepec.	48
Figura 7. Vista aguas arriba del río Yautepec en el municipio de Atlatlahucan, Mor.	49
Figura 8. Vista aguas arriba del río Yautepec en el municipio de Yautepec, Mor.	49
Figura 9. Vista aguas arriba del río Yautepec en la estación hidrométrica Ticumán.	50
Figura 10. Fisiografía de la cuenca de estudio.	51
Figura 11. Tipo de rocas presentes en la cuenca de estudio.	52
Figura 12. Tipos de climas presentes en la cuenca de estudio.	54
Figura 13. Tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio.	55
Figura 14. Uso del suelo y vegetación, serie I, de la cuenca de estudio.	57
Figura 15. Uso del suelo y vegetación, serie IV, de la cuenca de estudio.	58
Figura 16. Comparación de los usos del suelo en la cuenca de estudio.	60
Figura 17. División municipal y localidades de la cuenca de estudio.	62
Figura 18. Estación hidrométrica Ticumán.	64
Figura 19. Sistema de cable vía y canastilla de la estación hidrométrica.	64
Figura 20. Limnómetro de la estación hidrométrica.	65
Figura 21. Diagrama de flujo metodológico (Neitsch <i>et al.</i> , 2011).	70

Figura 22. Ubicación de los sitios de muestreo de suelos.	71
Figura 23. Sensor de conductividad eléctrica y pH.....	72
Figura 24. Paisaje característico del sitio uno de muestreo de suelo.	73
Figura 25. Perfil de suelo Fluvisol en la cuenca.	74
Figura 26. Paisaje característico del sitio dos de muestreo de suelo.	75
Figura 27. Perfil de suelo Regosol en la cuenca.	75
Figura 28. Paisaje característico del sitio tres de muestreo de suelo.....	76
Figura 29. Perfil de suelo Litosol en la cuenca.	77
Figura 30. Paisaje característico del sitio cuatro de muestreo de suelo.	78
Figura 31. Perfil de suelo Andosol en la cuenca.	78
Figura 32. Paisaje característico del sitio cinco de muestreo de suelos.	80
Figura 33. Perfil de suelo Cambisol.	80
Figura 34. Paisaje característico del sitio seis de muestreo de suelo.	81
Figura 35. Perfil de suelo Vertisol.	82
Figura 36. Paisaje característico del sitio siete de muestreo de suelo.	83
Figura 37. Perfil de suelo Feozem en la cuenca.	83
Figura 38. Paisaje característico del sitio ocho de muestreo de suelo.....	84
Figura 39. Perfil de suelo Rendzina en la cuenca.	85
Figura 40. Pendiente de la cuenca de estudio.....	86
Figura 41. Proceso de secado al sol de las muestras de suelo.	89
Figura 42. Determinación del color de suelo húmedo.	90
Figura 43. Extracción de 100 g de muestra de suelo.....	91
Figura 44. Pesado de 100 g de muestra de suelo.....	91

Figura 45. Proceso de bateo y separación de partículas.	91
Figura 46. Partículas mayores a 2 mm de diámetro.	92
Figura 47. Pesado de las partículas mayores a 2 mm de diámetro.	92
Figura 48. Estaciones meteorológicas convencionales utilizadas.	97
Figura 49. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas.	98
Figura 50. Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de dos años (Reich, 1963).	101
Figura 51. Acuíferos presentes en la cuenca de estudio.	106
Figura 52. Niveles estáticos medios reportados en la cuenca de estudio.	109
Figura 53. Periodo de crecimiento propuesto de la zona de riego presente en la cuenca de estudio.	115
Figura 54. Delimitación SWAT de la cuenca de estudio.	126
Figura 55. Identificación de las subcuencas presentes en la cuenca de estudio.	127
Figura 56. Cantidad total anual de agua que sale de las HRU a nivel subcuenca y entra en el cauce principal de 1980 a 1985.	128
Figura 57. Cantidad total anual de agua que sale de las HRU a nivel subcuenca y entra en el cauce principal de 2007 a 2009.	128
Figura 58. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2007 a 2009.	133
Figura 59. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2007 a 2009.	134
Figura 60. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 2007 a 2009.	135
Figura 61. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 2007 a 2009.	135

Figura 62. Comparación entre la precipitación observada en la cuenca y los escurrimientos medidos de 2006 a 2011.	136
Figura 63. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT de la etapa de validación mensual año 2011.	137
Figura 64. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT de la etapa de validación mensual año 2011.	137
Figura 65. Comparación entre la precipitación observada en la cuenca y los escurrimientos medidos de 1980 a 1985.	138
Figura 66. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.	140
Figura 67. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.	140
Figura 68. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.	141
Figura 69. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.	142
Figura 70. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2009 a 2011 número de curva vs Green & Ampt.	143
Figura 71. Dinámica de la producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.	146
Figura 72. Comparación entre la cantidad de sedimento medido y estimado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.	147
Figura 73. Dinámica de la producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.	148
Figura 74. Comparación entre la cantidad de sedimento medido y estimado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.	148

1. INTRODUCCIÓN

La información de precipitación y escurrimientos como parte del proceso hidrológico en pequeñas cuencas es difícil de obtener, así como medir los flujos superficiales a nivel de sitio, e implica un alto costo económico, además de requerir infraestructura y recursos humanos (Francisco, 2005).

Los modelos de cuenca simulan los procesos naturales del flujo de agua, sedimentos, sustancias químicas, nutrientes y organismos microbiológicos dentro de las cuencas y cuantifican el impacto humano en estos procesos (Singh y Frevert, 2005).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo para cuencas desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, a través del Servicio de Investigación Agrícola (ARS), y se ha aplicado en varias cuencas del mundo (USDA-ARS, 2015). El motor del modelo SWAT es el balance hidrológico de la cuenca a nivel diario, siendo el elemento central del mismo el separar lo que llueve, cuánto escurre y cuánto se infiltra. Para realizar tal cálculo, en México tradicionalmente se opta por el método de curva de escurrimiento, pero en los últimos años, en todo el mundo se cree que el método de Green & Ampt (Green & Ampt, 1911) es el más preciso.

Esta investigación fue desarrollada en la cuenca del río Yautepec, ya que actualmente sufre un fuerte proceso de urbanización influenciado por el crecimiento de las ciudades de Amecameca, Juchitepec, Cuernavaca, Yautepec, Oaxtepec y Cuautla, como centros principales de población. Esto origina una presión cada vez mayor en el recurso hídrico, tanto en las actividades agropecuarias como de abastecimiento público.

Por otra parte, la cuenca tiene una variabilidad en el uso del suelo que va desde los páramos de montaña del volcán Popocatepetl, hasta las zonas de agricultura de riego y selva baja caducifolia del estado de Morelos, resumida como una zona de transición de ecosistemas templado a cálidos, fungiendo además como un área de recarga de mantos acuíferos, de vital importancia para los centros urbanos mencionados.

Por su localización dentro de los estados de Morelos, México y Ciudad de México es una zona sensible, siendo necesario generar políticas de cooperación interestatales enfocadas a un plan de manejo regional.

La modelación hidrológica de esta cuenca tiene el fin de brindar información útil a los tomadores de decisiones y poseedores de los recursos naturales en la cuenca, especialmente el hídrico.

En el presente trabajo se calibró y validó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en la cuenca del río Yautepec en el estado de Morelos, el cual fue implementado satisfactoriamente para la predicción de escurrimientos que fluyen hasta la estación hidrométrica Ticumán; por lo tanto se recomienda ampliamente para los estudios futuros que se realicen dentro de dicha cuenca.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Yautepec hasta la estación hidrométrica Ticumán, Morelos, con el método de número de curva y compararlo con el método de Green & Ampt.

2.2. Objetivos particulares

2.2.1. Estimar la producción de escurrimientos y sedimentos que fluyen hasta la estación hidrométrica Ticumán para el periodo 1976 a 1985, y escurrimientos para el periodo 2002 a 2011 con la metodología de número de curva.

2.2.2. Aplicar el método de Green & Ampt para el periodo 2008 a 2011 en la estimación de la producción de escurrimientos y compararlo con el método de número de curva.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Definición de cuenca

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 2001); representada por la Figura 1.

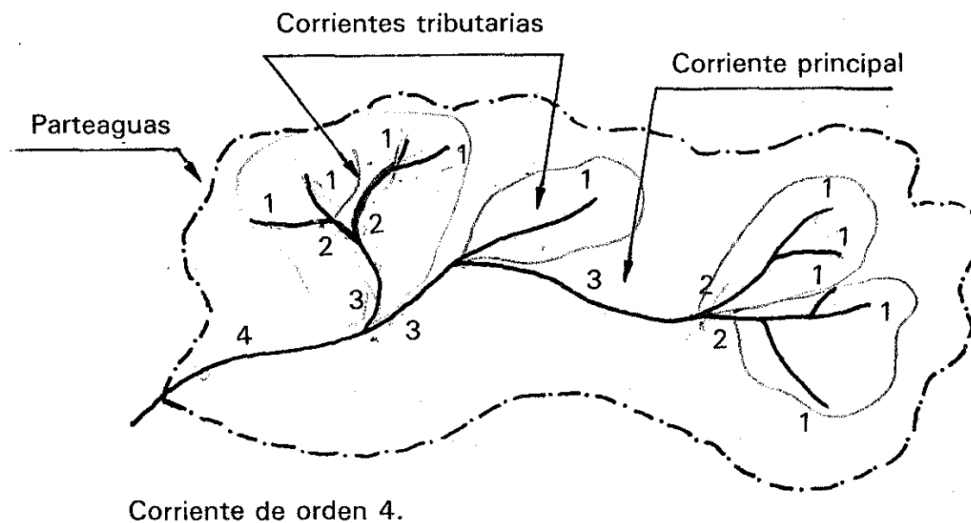


Figura 1. Representación de la cuenca (Aparicio, 2001).

El Diario Oficial de la Federación (DOF, 2014) establece que una cuenca es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas, aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o

bien una cuenca es el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos.

3.2. Problemática de la cuenca del río Yautepec

CONAGUA (2010) a través del comité de cuenca del río Yautepec ha identificado como principales problemas los siguientes:

- a) Elevado consumo y desperdicio del recurso hídrico.

La Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos (CEAMA, 2005) menciona que en el estado de Morelos se ha vivido erróneamente con la percepción de que en la cuenca del río Yautepec se cuenta con un recurso hídrico abundante; sin embargo, el volumen de las corrientes superficiales es irregular a lo largo del año, además de diversos factores que afectan directa o indirectamente la disponibilidad de agua superficial y subterránea.

- b) Bajo control en la contaminación de agua superficial.
- c) Existe un cierto grado de deficiencia en la gobernabilidad del agua.
- d) Inundaciones recurrentes.
- e) Limitaciones en la disponibilidad del agua.
- f) Baja productividad agrícola.
- g) Arrastre y depósito de sedimentos, basura, falla de taludes, entre otras afectaciones físicas.
- h) Invasión a zonas federales.

En años recientes, en el río Yautepec se ha incrementado la presencia, recurrencia y magnitud de zonas de conflicto y afectación hídrica, donde las actividades económicas sufren una paralización recurrente por las inundaciones provocadas en época de lluvia, las áreas de cultivo se ven dañadas gravemente y los inconvenientes para los habitantes de estas zonas son muchos.

Rodríguez (2015) indica que la urbanización tiene efectos indirectos como son la invasión de cauces naturales, planicies de inundación y deforestación de cuencas. En el caso del río Yautepec se presentan daños en las zonas urbanas de los municipios de Tlaltizapan, Tlaquilténango y Yautepec, Morelos.

Las condiciones fisiográficas de la cuenca del río Yautepec, particularmente en la zona comprendida por el municipio de Yautepec, la invasión de zonas federales y la obstrucción y azolvamiento de obras hidráulicas, son algunos de los factores que provocan que la región sea particularmente vulnerable a la presencia de inundaciones.

En la cuenca del río Yautepec se presentan inundaciones fluviales (ribereñas), cuando el agua se desborda de los ríos y ésta se queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. La causa de las inundaciones no sólo tiene el componente natural, sino que se incrementa y potencializa con el componente antropogénico. Las consecuencias de las inundaciones o desbordes son más graves para quienes habitan en las zonas de protección federal de los ríos, barrancas y arroyos, y a pesar de las advertencias de dichas autoridades, dichas zonas continúan siendo invadidas.

3.2.1 Algunos estudios previos en la cuenca del río Yautepec

Rodríguez (2015) menciona que se han realizado diversos estudios en ciertas zonas dentro de la cuenca del río Yautepec, de los cuales se mencionan los siguientes:

- Estudio de Aprovechamiento Hidráulico Integral y de Control de Inundaciones en el río Yautepec (Municipios de Yautepec, Tlatizapán, Tlaquiltenango y Jojutla), en el Estado de Morelos (CEAMA, 2005).

Objetivo: Analizar alternativas de solución y seleccionar la más óptima para disminuir y/o evitar las afectaciones a la población y áreas productivas causadas por las inundaciones generadas por el desbordamiento del río Yautepec; implementando modelos de simulación para analizar el comportamiento de la corriente.

- Tesis con título "Análisis del riego por inundaciones como consecuencia del desbordamiento del río Yautepec, Morelos, México (Zuñiga, 2009).

Objetivo: Analizar e integrar la información de la cuenca del río Yautepec con la finalidad de generar cartografía de peligros correspondientes a tres periodos de retorno (2, 5 y 10 años), así como diagnosticar la vulnerabilidad socioeconómica y la percepción del riesgo en viviendas y comercios ante el impacto de inundaciones.

Rodríguez (2015) como parte de su tesis de maestría titulada "Plan de gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Yautepec" planteo las bases para definir líneas de acción para un plan de gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Yautepec, asimismo de brindar las características morfológicas de la cuenca del río Yautepec definida hasta su conexión con el río Amacuzac.

3.3. Proceso de simulación

La simulación es una forma indirecta de investigación de la respuesta o conducta de un sistema, entendiéndose por sistema al arreglo de componentes físicos, un conjunto o

colección de casos, unidos o relacionados de tal manera que forman y actúan como una unidad, una entidad o un todo (Becht, 1974).

3.4. Simulación hidrológica

Es la representación de los procesos hidrológicos que ocurren en un área definida.

Van Liew y Garbrecht (2003) indican que el movimiento y almacenamiento del agua a escala de cuenca es un proceso complejo afectado principalmente por factores climáticos, topográficos, uso del suelo y vegetación, suelo, geología. Por lo tanto, se necesita información detallada temporal y espacialmente para abordar y resolver los problemas de los recursos hídricos, tales como la disponibilidad, gestión y suministro del agua, funcionamiento de los embalses y el desarrollo de la capacidad de almacenamiento de la misma. La naturaleza compleja de los procesos inherentes a la hidrología superficial y subsuperficial se investiga mejor mediante modelos computacionales que simulan estos procesos en intervalos de tiempo cortos y largos.

3.5. Definición de modelo

Salgado y Guitrón (2012) presentan la siguiente definición: "un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas".

Los modelos de cuenca computacionalmente basados pueden ahorrar tiempo y dinero debido a su capacidad para llevar a cabo la simulación a largo plazo de los efectos de los procesos de cuenca y las actividades de gestión en la calidad y cantidad del suelo y agua.

Estos modelos también facilitan la simulación de diversos efectos de los programas de conservación y ayudan en el diseño de políticas para mitigar la degradación de la calidad del suelo y agua mediante la determinación de los programas de conservación adecuados

para las cuencas hidrográficas particulares y sus ajustes agronómicos. Los modelos deben ser científicamente sólidos, robustos, y defendibles, con el fin de utilizar los resultados del modelo para tareas que van desde la regulación a la investigación (U.S. EPA, 2002).

Salas (2013) menciona que una de las grandes ventajas de los modelos es que una vez calibrados pueden ser usados para predecir lo que va a pasar ante un nuevo conjunto de condiciones que definen al modelo.

En los últimos años se ha observado un gran aumento en el número de modelos hidrológicos conceptuales propuestos o adoptados para la simulación del comportamiento de las cuencas hidrológicas. Los modelos descritos en la literatura técnica van desde el muy complicado modelo integral de Stanford (Crawford y Linsley, 1966) al sencillo modelo de propósito especial de regresión lineal (Diskin, 1970; Diskin *et al.*, 1973).

La regla básica para la selección de un modelo hidrológico es, según Dawdy (1969), adoptar el modelo más simple compatible con los usos a los que se destina el modelo. A excepción de algunos casos simples obvios (Diskin *et al.*, 1973), el desarrollo de un modelo para satisfacer un conjunto dado de condiciones y demandas no es una tarea simple. Sin embargo, la regla anterior solo es útil para aplicaciones prácticas si se dispone de una medida o medidas para evaluar el grado en el que el modelo satisface los requisitos de sus usuarios (Diskin *et al.*, 1973).

3.6. El modelo SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo de dominio público desarrollado conjuntamente por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de

Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (USDA-ARS) y Texas A&M AgriLife perteneciente al sistema de investigación de la universidad de Texas A&M.

SWAT es un modelo a escala de cuenca que opera a paso de tiempo diario o subhorario y está diseñado para predecir el impacto del uso del suelo y las prácticas de manejo en la cantidad y calidad del agua, sedimento, químicos agrícolas, etc.

El modelo es ampliamente utilizado en el manejo regional de cuencas hidrográficas, la evaluación, prevención y control de la erosión del suelo y control de fuentes no puntuales de contaminación (USDA-ARS, 2015).

Gassman *et al.*, (2007) mencionan que el modelo está físicamente basado, es computacionalmente eficiente y es capaz de realizar la simulación continua durante largos periodos de tiempo. Los principales componentes del modelo son: clima, hidrología, temperatura, propiedades del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, plaguicidas, bacterias, patógenos y uso del suelo. En SWAT, una cuenca se divide en múltiples subcuencas, que luego se subdividen en unidades de respuesta hidrológicas (HRU por siglas en inglés) que consisten en áreas con uso del suelo, topografía y suelos homogéneos; las HRU (por sus siglas en inglés Hydrologic Response Units) representan porcentajes del área de la subcuenca. Alternativamente, una cuenca puede subdividirse internamente por uso del suelo, y suelos dominantes.

Gassman *et al.*, (2007) citados por Barrios & Urribarri (2010) indican que SWAT mínimamente para operar requiere de datos climáticos diarios, incluyendo precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, los cuales pueden ser registros medidos o generados por el mismo modelo; si tiene que generarlos, los calcula de una tabla que contiene 13 variables climáticas mensuales introducidas por el usuario, estimadas a partir de mediciones de largo plazo

de los registros climáticos. SWAT realiza un balance hidrológico general para cada HRU, en el cual la precipitación, más riego y deshielo, se divide en escurrimiento superficial e infiltración, redistribución del agua en el perfil del suelo, evapotranspiración, flujo subsuperficial lateral proveniente del perfil del suelo y flujo de retorno desde los acuíferos superficiales. La recarga debajo del perfil se distribuye entre los acuíferos superficial y profundo. Desde el primero, además del flujo de retorno, también puede ocurrir evapotranspiración por plantas de raíces profundas; el agua que va al acuífero profundo se asume que sale del sistema.

Neitsch *et al.*, (2011) mencionan que el principio básico de funcionamiento interno del SWAT, desde el punto de vista de las bases teóricas, es el balance hidrológico a nivel diario de la cuenca y aunque su intervalo de tiempo de cálculo es diario, el software también genera reportes mensuales y anuales (Figura 2).

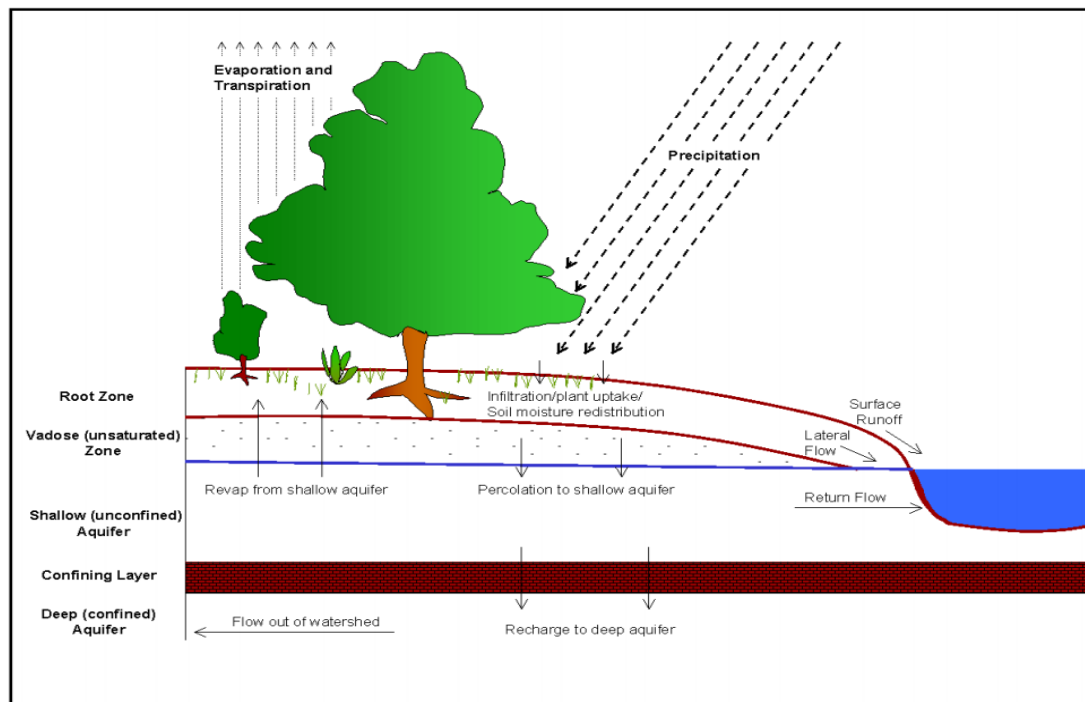


Figura 2. Representación del balance hídrico SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

SWAT considera el concepto del balance de agua, como el agua que entra, que se almacena y que sale de la cuenca, como lo describe la ecuación 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua del suelo para el periodo de tiempo; SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i ; R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i ; Q_{surf} es la cantidad de escurrimientos de la superficie en un día i ; E_a es la cantidad de evapotranspiración en un día i ; W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en día i ; Q_{gw} es la lámina de flujo base en un día i , todas las unidades de las variables se expresan en mm. Los procesos hidrológicos incluidos en tal balance reportan resultados de láminas en milímetros. Entre los procesos hidrológicos incluidos están la evapotranspiración y los escurrimientos y da la opción de elegir varios métodos de cálculo para cada uno de ellos, dependiendo de las necesidades del usuario.

3.6.1. Algunos estudios del modelo SWAT

Torres *et al.*, (2005) con el modelo SWAT enfatizaron la calibración y validación sólo en los escurrimientos para el río La Laja, Guanajuato, en la Región Hidrológica núm. 12 del río Lerma cuya cuenca cubre 7,016 km². Shen *et al.*, (2009) usaron SWAT para modelar la erosión de la cuenca que drena hacia la presa Tres Gargantas en China, con una superficie de 40,005 km²; el modelo fue calibrado y validado a la salida, con calibraciones de escurrimientos y sedimentos. Rivera *et al.*, (2012) usaron SWAT para modelar la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, con una superficie de 140 km², dando énfasis especial al cálculo de la erosión hídrica, no calibraron el modelo y reportaron que el factor topográfico LS de la ecuación de pérdida de suelo, es subestimado por el SWAT en subcuencas con pendiente mayor de 25 %, por lo cual se

debe revisar este parámetro cuando se calibra el modelo; Salas *et al.*, (2014) recomiendan poner especial interés en calibrar tres productos de salida del SWAT de los cuales hay valores de medición para comparar biomasa, volúmenes de escurrimiento anual y mensual, y producción de sedimentos.

Ramírez (2014) indica que SWAT es un modelo a escala de cuenca, desarrollado para cuantificar el impacto de las prácticas utilizadas para el manejo del territorio en cuencas grandes y complejas; el modelo se basa en parámetros disponibles en sus propias bases de datos, pero permite su modificación para adaptarlo a condiciones locales de la cuenca de estudio, lo que proporciona una flexibilidad al modelo; es un modelo basado en procesos físicos. La realización de los cálculos y los procesos del modelo pueden llevarse a cabo por equipos informáticos habituales; permite simular procesos interactivos y diferentes tipos de manejo del territorio.

No se debe utilizar en cuencas donde no hay medición, ya que es fundamental la existencia de estaciones de aforo y de calidad del agua que proporcionen series de datos en cantidad suficiente para su correcta calibración y validación; es necesario introducir gran cantidad de parámetros en el modelo que influye en diferentes partes del mismo, por lo que la calibración es compleja; muchos parámetros aportados por el modelo tienen una base empírica, no siempre obtenida bajo las condiciones de aplicación del modelo, por lo que es necesario valorar su implementación en cada caso y utilizar datos locales, si están disponibles. La calibración y validación del modelo pueden solventar alguno de estos problemas, siendo el modelo no diseñado para simular en detalle eventos hidrológicos en particular. La aplicabilidad de los modelos matemáticos de simulación hidrológica de cuencas, como el caso del modelo SWAT, en los países menos

desarrollados han encontrado dos barreras: la escasez de datos y la desconfianza en modelos desarrollados en otras latitudes.

Modelos como SWAT requieren un elevado volumen de datos de entrada; sin embargo, como señalo Silva (2004), "Los requerimientos de información para el empleo de SWAT pueden ser satisfechos con dificultades sorteables", partiendo del hecho de que a menudo es difícil la obtención de datos con base física para la modelación hidrológica, aun en los países desarrollados, donde los datos de elevada calidad están presentes.

3.7. Hidrología SWAT

Cuando la precipitación ocurre, puede ser interceptada y retenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo (Neitsch *et al.*, 2011). El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil del mismo o fluirá sobre el terreno como escurrimiento. El agua se mueve generando escurrimiento relativamente rápido hacia un canal tributario, incrementando en corto plazo la corriente principal. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de la superficie-agua a través de pasos subterráneos (Neitsch *et al.*, 2011). Los conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las unidades de respuesta hidrológica (HRU's) se ilustran en la Figura 3.

3.7.1. Intercepción vegetal

La intercepción vegetal es el agua interceptada por superficies vegetativas donde se mantiene y se hace disponible para la evaporación. Cuando se usa el método de número de curva para calcular el escurrimiento, la intercepción vegetal se toma en cuenta en los cálculos de escurrimiento.

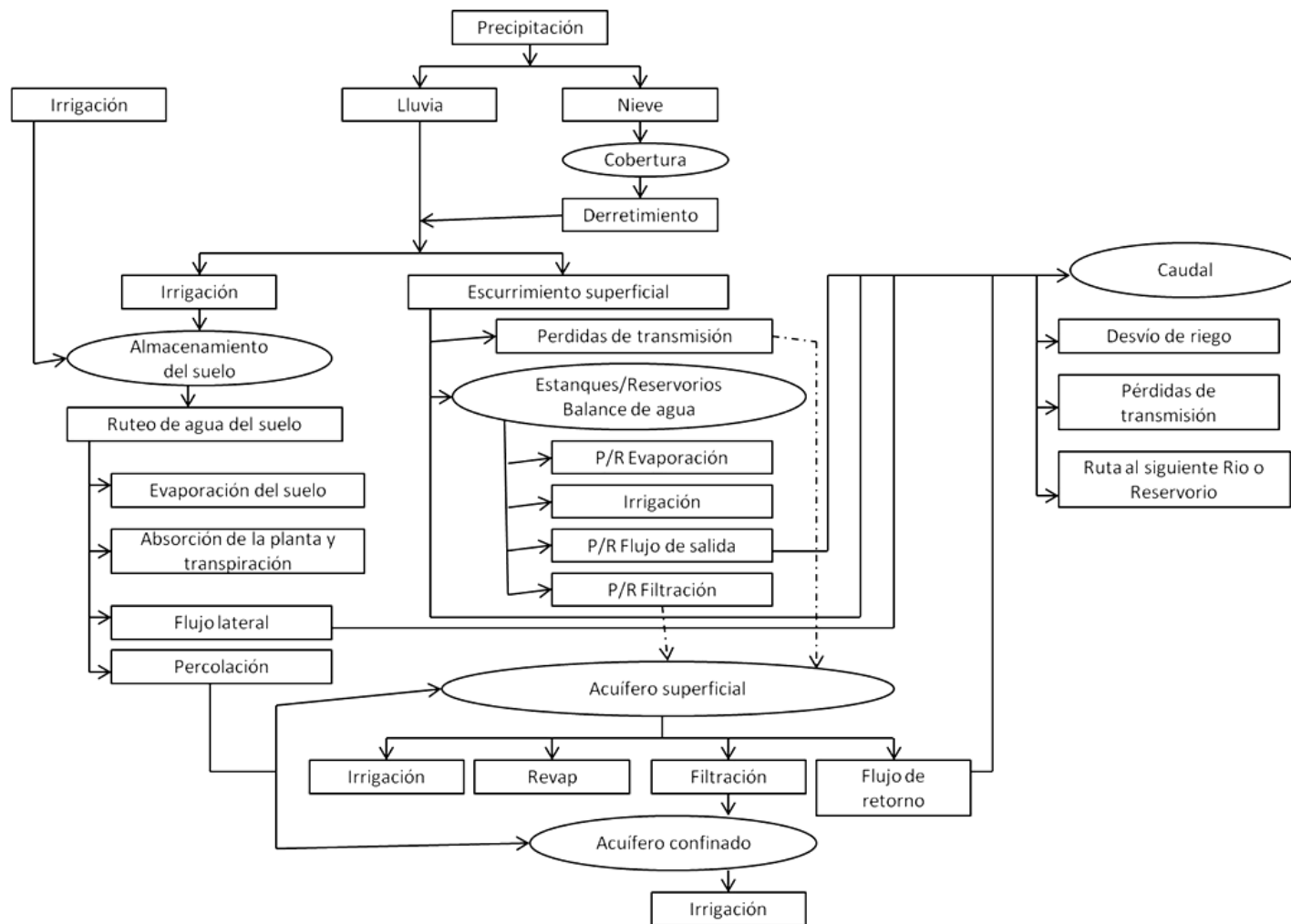


Figura 3. Esquema de las vías disponibles para el movimiento del agua en SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

Sin embargo, si el método de Green & Ampt se usa para modelar la infiltración y escurrimientos, la intercepción vegetal debe ser modelada separadamente. SWAT permite al usuario ingresar la cantidad máxima de agua que puede almacenarse en el dosel en el índice máximo de área foliar para cobertura del suelo.

Este valor y el índice del área foliar se utiliza por el modelo para calcular el almacenamiento máximo en el tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura del suelo. Cuando la evaporación es calculada, el agua primero se remueve de la intercepción vegetal (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.2. Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada vertical de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, el suelo llega a estar cada vez más húmedo, causando que la tasa de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad del suelo antes de la introducción de agua en su superficie. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada del suelo. Debido a que el método de número de curva se usa para calcular el escurrimiento superficial operando en un paso de tiempo diario, entonces ocurre que no se puede modelar directamente la infiltración, la cantidad de agua que entra en el perfil del suelo se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escurrimiento superficial. El método de infiltración de Green & Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere de datos de precipitación subhorarios (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.3. Redistribución

La redistribución se refiere al movimiento continuo del agua a través de un perfil de suelo después de la entrada de agua (a través de la precipitación o riego) y una vez que

ha dejado la superficie del suelo. La redistribución es causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil, una vez que el contenido de agua a lo largo de todo el perfil es uniforme, la redistribución cesará. El componente de redistribución de SWAT utiliza una técnica de enrutamiento de almacenamiento para predecir el flujo a través de cada capa de suelo en la zona radicular. El flujo hacia abajo, o percolación se produce cuando se excede la capacidad de campo de una capa de suelo y la capa debajo no está saturada. La tasa de flujo se rige por la conductividad saturada de la capa del suelo. La redistribución se afecta por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa particular es 0 °C o menor, no se permitirá la redistribución de la capa (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.4. Evapotranspiración

Neitsch *et al.*, (2011) indican que la evapotranspiración es un término colectivo para todos los procesos en el que agua en fase líquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. La evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto, y superficies vegetativas; evaporación dentro de las hojas de las plantas (transpiración); y la sublimación de superficies de hielo y nieve. El modelo calcula la evaporación de suelos y plantas separadamente como los describe Ritchie (1972).

La evaporación potencial del agua del suelo se estima como una función de la evapotranspiración potencial y el índice del área foliar. La evaporación actual del agua del suelo se estima usando funciones exponenciales de profundidad del suelo y el contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área foliar (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.4.1. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial es la proporción en la cual la evapotranspiración ocurriría dentro de un área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua del suelo. Esta proporción se asume para no ser afectada por efectos de procesos micro-climáticos como advección o calor de almacenamiento (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.5. Flujo lateral subterráneo

El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie, pero por encima de la zona donde el sistema está saturado con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil del suelo (0 - 2 m) se calcula simultáneamente con la redistribución. Un modelo cinemático de almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa del suelo (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.6. Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. Usando precipitación diaria o subhoraria, SWAT simula los volúmenes de escurrimiento superficial y gastos máximos para cada HRU (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.7. Cuerpos de agua

Los estanques o humedales son estructuras de almacenamiento de agua situados dentro de una subcuenca que intercepta las corrientes de superficie. La zona de captación de un reservorio se define como una fracción del área total de la subcuenca. Estos almacenamientos se suponen que se encuentran fuera del canal principal en un subcuenca y nunca recibirán agua de cuencas río arriba. El almacenamiento del agua del estanque es una función de la capacidad del mismo, afluencias y desagües diarios, la infiltración y la evaporación. Las entradas necesarias para el modelo si se incluyen son la

capacidad de almacenaje de estos y la relación áreas-capacidades. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.8. Cauces

Dos tipos de cauces son definidos dentro de una subcuenca: el canal principal y los cauces tributarios. Los cauces tributarios son canales secundarios o de más bajo orden que se separan del canal principal dentro de la cuenca hidrográfica. Cada cauce tributario dentro de una subcuenca drena solo una parte de la subcuenca y no recibe contribución de las aguas subterráneas a su flujo. Todo el flujo en los canales tributarios se encamina y libera a través del canal principal de la subcuenca. SWAT utiliza los atributos de los canales tributarios para determinar el tiempo de concentración de las subcuencas (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.9. Pérdidas de transmisión

Las pérdidas de transmisión son las pérdidas de flujo superficial a través de la lixiviación del lecho del río. Este tipo de pérdida se produce en los arroyos efímeros o intermitentes donde el aporte de agua subterránea se produce sólo en determinadas épocas del año. SWAT utiliza el método de Lane (1983), para estimar las pérdidas de transmisión. Las pérdidas de agua desde el canal son una función de su ancho y longitud y de la duración del flujo. Tanto el volumen de escurrimiento como el gasto máximo se ajustan cuando se producen pérdidas de transmisión en los canales tributarios (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.10. Flujo base

El flujo de retorno, o flujo base, es el volumen procedente de las aguas subterráneas. SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y

libre, que contribuye al flujo de retorno dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y confinado que contribuye al flujo de retorno a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold *et al.*, 1993).

El agua que se filtra más allá del fondo de la zona de raíz se divide en dos fracciones cada una se convierte en recarga para cada uno de los acuíferos. El agua en el acuífero superficial o profundo puede ser retirada por bombeo (Neitsch *et al.*, 2011).

3.7.11. Agua subterránea

Un acuífero es "una unidad geológica que puede almacenar agua y transmitirla a una velocidad lo bastante rápida para ser hidrológicamente significativa" (Dingman, 1994).

Tinajero (1982) considera un acuífero a toda formación geológica permeable y porosa que permite la transmisión y almacenamiento de agua que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables.

Tarbuck y Lutgens (2005) definen un acuífero a los estratos de roca o sedimentos permeables que transmiten libremente el agua subterránea.

Arnold *et al.*, (1993) señalan que un acuífero no confinado es aquel cuyo límite superior es el nivel freático. Un acuífero confinado es aquel que está delimitado por encima y abajo por formaciones geológicas cuya conductividad hidráulica es significativamente más baja que la del acuífero no confinado.

La recarga de los acuíferos no confinados ocurre a través de la percolación hacia el nivel freático desde una parte considerable de la superficie terrestre. En contraste, la recarga de los acuíferos confinados por percolación desde la superficie terrestre se da solamente agua arriba al final del acuífero confinado donde la formación geológica que contiene el acuífero está expuesta en la superficie terrestre, el caudal no está limitado y se encuentra el nivel freático.

SWAT simula dos acuíferos en cada subcuenca. El acuífero poco profundo (shallow aquifer) es un acuífero no confinado que contribuye al flujo hacia el cauce principal o tramo de la subcuenca. El acuífero profundo es un acuífero confinado. Se supone que el agua que entra al acuífero profundo contribuye al flujo de la corriente en algún lugar fuera de la cuenca hidrográfica como se indica en la Figura 4.

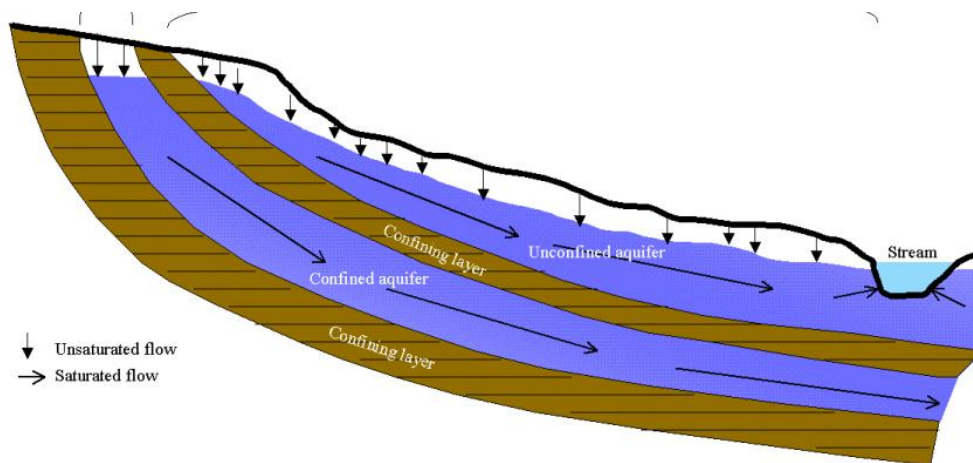


Figura 4. Acuíferos confinados y no confinados (Dingman, 1994).

3.8. Cálculo de los volúmenes de escurrimiento superficial

Dentro de la modelación hidrológica SWAT, en el aspecto hidrológico, existen dos alternativas: número de curva (CN) (SCS, 1972) y el de Green & Ampt (1911), ambos modelos han sido ampliamente aceptados y se utilizan en muchas aplicaciones (Chow *et al.*, 1988; Arnold y Allen, 1996; Mays, 2005).

3.8.1. Método de número de curva de escurrimiento en SWAT

El método SCS número de curva es un modelo empírico que se volvió común en los años 50's del siglo XX, fue el producto de más de 20 años de estudios que involucraban las relaciones de lluvia y escurrimiento de pequeñas cuencas rurales alrededor de los Estados Unidos. El modelo fue desarrollado para proveer una base consistente para

estimar las cantidades de escurrimiento bajo diferentes usos y tipos de suelo (Rallison y Miller, 1981).

El método de número de curva de escurrimiento estima la cantidad de escurrimiento primero, y asume que la precipitación restante será infiltrada, utilizando los valores numéricos por el SCS (SCS, 1972).

El software SWAT calcula el escurrimiento partiendo de la ecuación 2 de número de curva SCS (SCS, 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

Donde Q_{surf} es el escurrimiento acumulado o el exceso de lluvia (mm); R_{day} es la altura de la precipitación diaria (mm); I_a es la abstracción inicial que incluye almacenamiento de la superficie, intercepción e infiltración antes del escurrimiento (mm) y S es el parámetro de retención.

El parámetro de retención varía espacialmente debido a cambios en suelos, uso del suelo, manejo y pendiente, y, temporalmente debido a cambios en el contenido de agua en el suelo. El parámetro S se calcula con la ecuación 3.

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Donde CN es el número de curva del día i . Las abstracciones iniciales I_a son comúnmente aproximadas como $0.2S$ y la ecuación 2 se convierte en la ecuación 4.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (4)$$

Para $R_{day} = 0.2S$, de otra forma $Q_{surf} = 0.0$.

El número de curva CN es una función de la permeabilidad de los suelos, del uso del suelo y de las condiciones de humedad antecedente (Cuadros 1 y 2).

Cuadro 1. Valores de CN para zonas urbanas.

Descripción del uso del suelo		Grupo de suelo hidrológico			
Áreas urbanas completamente desarrolladas (vegetación establecida) ^a		A	B	C	D
Áreas abiertas, parques, césped, campos de Golf, cementerios, etc.					
Óptimas condiciones: cobertura de pastos en 75% del área o más.		39	61	74	80
Condiciones aceptables: cobertura de pastos de 50 a 75% del área.		49	69	79	84
Condición pobre: cobertura de pastos menor del 50% del área.		68	79	86	89
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Carreteras y caminos					
Pavimentados con cunetas y Alcantarillados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Basureros		72	82	87	89
		% de permeabilidad ^b			
Pavimentadas con cubiertas abiertas		83	89	92	93
Áreas empresariales y comerciales	85	89	92	94	95
Distritos industriales	72	81	88	91	93
Fraccionamientos, poblados y áreas residenciales con tamaño de 1/8 de acre o menos.	65	77	85	90	92
Residencial: tamaño promedio del lote					
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82
Áreas urbanas desarrolladas (vegetación no establecida)					
Áreas recientemente clasificadas		77	86	91	88
Áreas urbanas del desierto occidental					
Paisaje del desierto natural (solo área permeable)		63	77	85	88
Paisaje desértico artificial		96	96	96	96

Fuente: McCuen (2005).

Cuadro 2. Valores de CN para uso agrícola del suelo.

Descripción del uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupo de suelo hidrológico			
			A	B	C	D
Suelo agrícola cultivado						
Barbecho	Surcos rectos o suelo desnudo	----	77	86	91	94
	Labranza de conservación	Pobre	76	95	90	93
	Labranza de conservación	Buena	74	93	88	90
	Surcos continuos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos continuos	Buena	67	78	85	89
	Labranza de conservación	Pobre	71	80	87	90
Cultivos en línea	Labranza de conservación	Buena	64	75	82	85
	Contorneado	Pobre	70	79	84	88
	Contorneado	Buena	65	75	82	86
	Contorneado y cultivos de conservación	Pobre	69	78	83	87
	Contorneado y cultivos de conservación	Buena	64	74	81	85
	Contorneado y terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Contorneado y terrazas	Buena	62	71	78	81
	Contorneado y terrazas con cultivos de conservación	Pobre	65	73	79	81
	Contorneados y cultivos de conservación	Buena	61	70	77	80
	Surcos continuos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos continuos	Buena	63	75	83	87
	Cultivos de conservación	Pobre	64	75	83	86
	Cultivos de conservación	Buena	60	72	80	84
	Contorneado	Pobre	63	74	82	85
	Contorneado	Buena	61	73	81	84
	Granos pequeños	Contorneado y cultivos de cultivos de conservación	Pobre	62	73	81
Contorneado y cultivos de conservación		Buena	60	72	80	83
Contorneado y terrazas		Pobre	61	72	79	82
Contorneado y terrazas		Buena	59	70	78	81
Contorneado y terrazas		Pobre	60	71	78	81

	con cultivos de conservación					
	Contorneado y cultivos de conservación	Buena	58	69	77	80
	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89
Leguminosas o praderas con rotación de cultivos	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Contorneo	Pobre	64	75	83	85
	Contorneo	Buena	55	69	78	83
	Contorneo y terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Contorneado y terrazas	Buena	51	67	76	80
	Tratamiento no mecanizado	Pobre	68	79	86	89
	Tratamiento no mecanizado	Media	49	69	79	84
Tierra agrícola no cultivada áreas de pastoreo	Tratamiento no mecanizado	Buena	39	61	74	80
	Contorneado	Pobre	47	67	81	88
	Contorneado	Media	25	59	75	83
	Contorneado	Buena	6	35	70	79
	Contorneado	Buena	6	35	70	79
Pradera permanente		----	30	58	71	78
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos		Pobre	55	73	82	86
		Media	44	65	76	82
		Buena	32	58	72	79
Matorral		Pobre	48	67	77	83
		Media	35	56	70	77
		Buena	30	48	65	73
Bosque o selva		Pobre	45	66	77	83
		Media	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Finca		----	59	74	82	86

Fuente: McCuen (2005).

3.8.1.1. Grupo hidrológico de los suelos

El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos de Norteamérica (NRCS, por sus siglas en inglés), clasifica a los suelos en cuatro grupos hidrológicos (mismos que están presentes en los Cuadros 1 y 2) basados en las características físicas de los mismos.

El NRCS (1996) define a un grupo hidrológico como un grupo de suelos que poseen un potencial similar de escurrimiento bajo condiciones similares de cubierta y de tormenta.

Las propiedades que influyen en el potencial de escurrimiento son aquellas que impactan

el índice mínimo de infiltración para un horizonte después de una humedad prolongada. Estas propiedades son profundidad del nivel freático, conductividad hidráulica saturada y profundidad de una capa impermeable.

El grupo de suelos es determinado a partir de la clasificación de SCS (1972) que los clasifica de la siguiente forma:

- Grupo hidrológico A: Los suelos en este grupo tienen un bajo potencial de escurrimiento cuando están completamente mojados. El agua se transmite libremente a través del suelo. Los suelos suelen tener menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena o gravas y tienen texturas de grava o arena. Algunos suelos con textura areno-arcillosa, franco-arenosa, franca o franca limosa pueden ser colocados en este grupo si están bien agregados, de baja densidad aparente, o contienen más 35 % de fragmento de roca.

Los límites de las características físicas de diagnóstico del grupo A son los siguientes: a) La conductividad hidráulica saturada de todas la capas del suelo excede los $144.02 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. b) La profundidad a cualquier capa impermeable al agua es mayor de 50 cm. c) La profundidad de la capa freática es mayor a 60 cm. Los suelos que tienen una profundidad mayor a 100 cm a la capa impermeable están en el grupo A, si la conductividad hidráulica saturada de todas las capas del suelo a menos de 100 cm es superior a $36.07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

- Grupo hidrológico B: Los suelos de este grupo tienen un potencial moderado a bajo de escurrimiento cuando están completamente mojados. La transmisión de agua a través del suelo es sin obstáculos. El grupo B típicamente tienen entre un 10 % y 20 % de arcilla, 50 % a 90 % de arena y tienen texturas arenosa-franco o franco arenosa. Algunos suelos que poseen textura franca, franco-limosa, limo,

franco-arcillo-arenosa pueden ubicarse en este grupo si están bien agregados, de baja densidad aparente, o contienen más del 35 % de fragmentos de roca.

Los límites de las características físicas de diagnóstico del grupo B son los siguientes: a) La conductividad hidráulica saturada en la capa menos transmisora entre la superficie y 50 centímetros varía de $36.07 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a $144.02 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. b) La profundidad a cualquier capa impermeable al agua es mayor que 50 centímetros. c) La profundidad de la capa freática es mayor de 60.

Los suelos que son más profundos que 100 centímetros a una capa impermeable al agua o nivel freático, están en el grupo B si la conductividad hidráulica saturada de todas las capas del suelo a menos de 100 centímetros de la superficie es superior a $14.48 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, pero es de menos de $36.07 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

- Grupo hidrológico C: Los suelos de este grupo tienen un potencial moderadamente alto de escurrimiento cuando están completamente mojados. La transmisión de agua a través del suelo es algo limitada. Estos suelos típicamente tienen entre 20 % y 40 % de arcilla, menos del 50 % de arena, y texturas francas, franco-limoso, franco-arcillo-arenosa, franco-arcilloso, limosas, franco-arcillo-limoso. Algunos suelos que tienen arcilla, arcilla-limosa, arena-arcillosa pueden ser colocados en este grupo si están bien agregados, de baja densidad aparente, o contienen más de 35 % fragmentos de roca.

Los límites de las características físicas de diagnóstico del grupo C son los siguientes. a) La conductividad hidráulica saturada en la capa menos transmisora entre la superficie y 50 centímetros está entre $3.56 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y $36.07 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. b) La profundidad a cualquier capa impermeable al agua es mayor que 50 centímetros. c) La profundidad de la capa freática es mayor de 60 centímetros.

Los suelos que son más profundas de 100 centímetros a una restricción o capa freática están en el grupo C si la conductividad hidráulica saturada del suelo de todas las capas de suelo dentro de los 100 cm de la superficie es superior a $1.52 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, pero es inferior a $14.48 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

- Grupo hidrológico D: Los suelos de este grupo tienen un alto potencial de escurrimiento cuando están completamente mojados. El movimiento del agua a través del suelo está restringida. Tienen típicamente mayor que 40 % de arcilla, a menos de 50 % de arena, y tienen texturas arcillosas. En algunas áreas, también tienen un alto potencial de expansión-contracción. Todos los suelos con una profundidad de agua de una capa impermeable a menos de 50 centímetros y todos los suelos con una capa freática dentro de los 60 centímetros de la superficie están en este grupo.

Los límites de las características físicas de diagnóstico físicas del grupo D son los siguientes: a) Para suelos con un capa impermeable al agua a una profundidad entre 50 centímetros y 100 centímetros, la conductividad hidráulica saturada en la capa de suelo menos transmisora es menor que o igual $3.56 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. b) Para los suelos con profundidad mayor a 100 centímetros a la capa freática, la conductividad hidráulica saturada de todas las capas del suelo a menos de 100 centímetros de la superficie es inferior o igual a $1.52 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

3.8.1.2. Condición de humedad antecedente del suelo

El SCS (SCS, 1972) define tres condiciones de humedad antecedente:

- I. Seca (punto de marchitez permanente)
- II. Humedad promedio
- III. Húmeda (capacidad de campo)

Neitsch *et al.*, (2011) mencionan que el número de curva de la condición de humedad I es el menor valor diario de número de curva que puede asumirse en condiciones secas. Los números de curva para condiciones de humedad I y III se calculan con las ecuaciones 5 y 6.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 * (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 * (100 - CN_2)])} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 * \exp[0.00673 * (100 - CN_2)] \quad (6)$$

Donde CN_1 es el número de curva de la condición de humedad I; CN_2 es el número de curva de la condición de humedad II y CN_3 es el número de curva de la condición de humedad III.

3.8.1.3. Parámetro de retención

Dentro de SWAT se pueden usar dos métodos calcular el parámetro de retención. El método tradicional es permitir variar el parámetro de retención con el contenido de humedad del suelo. La otra alternativa permite variar el parámetro de retención con la evapotranspiración acumulada de la planta.

El cálculo del valor del CN diario como una función de la evapotranspiración de la planta fue adicionado porque el método de contenido de humedad del suelo predecía demasiado escurrimiento en suelos someros. Calculando el CN diario como una función de la evapotranspiración de la planta, el valor es menos dependiente del almacenamiento del suelo y más dependiente del antecedente climático.

Cuando el parámetro de retención varía con el contenido de agua en el perfil del suelo, se usa la ecuación 7.

$$S = S_{max} * \left(1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 * SW)]}\right) \quad (7)$$

Donde S es el parámetro de retención para un día dado (mm); S_{max} es el valor del parámetro de retención máximo que se puede lograr en cualquier día (mm); SW es el contenido de agua en el perfil excluyendo la cantidad de agua contenida en el perfil del suelo en el punto de marchitez permanente (mm); y w_1 y w_2 son coeficientes de forma. El valor máximo del parámetro de retención, S_{max} se calcula resolviendo la ecuación 3, usando la CN_1 .

Los coeficientes de forma w_1 y w_2 se calculan empleando las ecuaciones 8 y 9 y se determinan resolviendo la ecuación 7 asumiendo que:

- El parámetro de retención para el número de curva de la condición de humedad I corresponde al contenido de agua en el perfil del suelo en el punto de marchitez.
- El parámetro de retención para el número de curva de la condición de humedad III corresponde al contenido de agua en el perfil a capacidad de campo.
- El suelo tiene un número de curva de 99 ($S = 2.54$) cuando está completamente saturado.

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC \right] + w_2 * FC \quad (8)$$

$$w_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{SAT}{1 - 2.54 * S_{max}^{-1}} - SAT \right] \right)}{(SAT - FC)} \quad (9)$$

Donde FC es la cantidad de agua en el perfil del suelo a capacidad de campo (mm); S_3 es el parámetro de retención para el número de curva de la condición de humedad III; S_{max} es el parámetro de retención para el número de curva de la condición de humedad I; SAT es la cantidad de agua en el perfil del suelo cuando está completamente saturado (mm).

Cuando el parámetro de retención varía con la evapotranspiración de la planta, se usa la ecuación 10 para actualizar el parámetro de retención en el final de cada día.

$$S = S_{prev} + E_o * \exp\left(\frac{-cncoef * S_{prev}}{S_{max}}\right) - R_{day} + Q_{surf} \quad (10)$$

Donde S es el parámetro de retención para un día dado (mm); S_{prev} es el parámetro de retención para el día previo (mm); E_o es la evapotranspiración potencial para el día (mm día⁻¹); $cncoef$ es el coeficiente de peso usado para calcular el coeficiente de retención para el cálculo del número de curva diaria dependiente de la evapotranspiración de la planta; S_{max} es el máximo valor para el parámetro de retención que se puede lograr en cualquier día (mm); R_{day} es la altura de la lluvia en el día (mm). El valor inicial del parámetro de retención se definió como $S = 0.9 * S_{max}$.

Cuando se congela la capa superior del suelo, el parámetro de retención se modifica usando la ecuación 11:

$$S_{frz} = S_{max} * [1 - \exp(-0.000862 * S)] \quad (11)$$

Donde S_{frz} es el parámetro de retención ajustado a condiciones de congelamiento (mm), El valor ajustado del número de curva diario para el contenido de humedad del suelo en SWAT es calculada reordenando la ecuación 3, e insertando el parámetro de retención calculado para cada contenido de humedad en la ecuación 12:

$$CN = \frac{25400}{(S + 254)} \quad (12)$$

Donde CN es el número de curva en un día dado y S es el parámetro de retención calculado para el contenido de humedad del suelo en cada día (Neitsch *et al.*, 2011).

3.8.1.4. Ajustes de pendiente

Los números de curva de la condición de humedad II provistos en las tablas son asumidos para pendientes del suelo $\leq 5\%$.

Williams (1995) desarrollo la ecuación 13 para ajustar el número de curva a diferentes pendientes y lo denomino CN_{2s} .

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} * [1 - 2 * \exp(13.86 * slp)] + CN_2 \quad (13)$$

Donde CN_{2s} es el número de curva para la condición de humedad II ajustada para la pendiente; CN_3 es el número de curva para la condición de humedad III para la pendiente por defecto de igual o menor de 5%; CN_2 es el número de curva para la condicione de humedad II para la pendiente por defecto de 5% y slp es la fracción promedio de la pendiente de cada subcuenca.

Pérez (2013) menciona que para el cálculo de los CN ajustados por pendiente para las condiciones de humedad antecedente I y III, se emplean las ecuaciones 14 y 15.

$$CN_{1s} = CN_{2s} - \frac{20(100 - CN_{2s})}{100 - CN_{2s} + \exp[2.533 - 0.036(100 - CN_{2s})]} \quad (14)$$

$$CN_{3s} = CN_{2s} * \exp[0.00673(100 - CN_{2s})] \quad (15)$$

3.8.2. Método de Green & Ampt en SWAT

La ecuación de Green & Ampt, fue desarrollada por dichos autores en 1911, para poder predecir la infiltración asumiendo exceso de agua en la superficie en todo el tiempo (Green y Ampt, 1911). La ecuación asume que el perfil del suelo es homogéneo y la humedad antecedente se distribuye uniformemente en el perfil. A medida que el agua se infiltra en el suelo, el modelo asume que el suelo sobre el frente de humedecimiento está completamente saturado y que hay una interrupción aguda en el contenido de humedad en el frente húmedo. En la Figura 5 se ilustra de forma gráfica la diferencia entre la

distribución de humedad con la profundidad modelada por el método de Green & Ampt y lo que ocurre en la vida real.

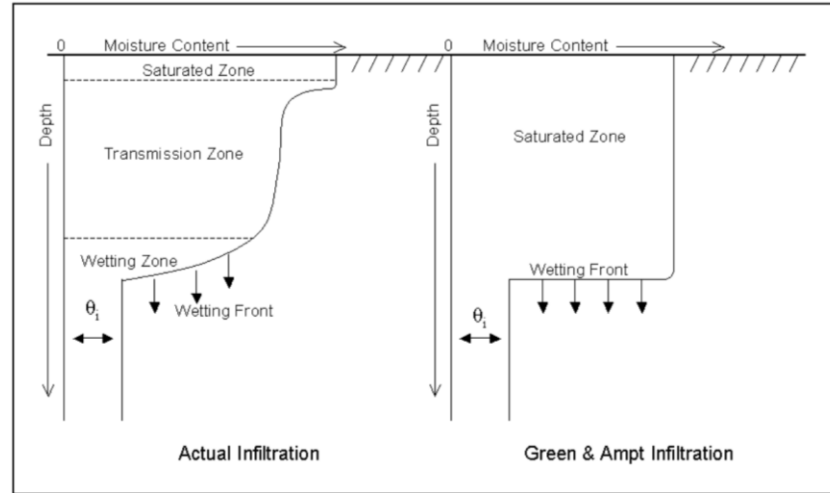


Figura 5. Comparación del contenido de humedad modelado por Green & Ampt vs típica distribución observada (Neitsch *et al.*, 2011).

Mein y Larson (1973) desarrollaron una metodología para determinar tiempo de estancamiento con infiltración, utilizando la ecuación de Green y Ampt. El método de exceso de lluvia Green-Ampt Mein-Larson se incorporó a SWAT para proveer una opción alternativa para determinar el escurrimiento superficial. Este método requiere que el usuario provea de datos de precipitación subhoraria.

La tasa de infiltración Green-Ampt Mein-Larson se define en la expresión 16:

$$f_{inf,t} = K_e * \left(1 + \frac{\psi_{wf} * \Delta\theta_v}{F_{inf,t}}\right) \quad (16)$$

Donde $f_{inf,t}$ es el índice de infiltración en el tiempo t ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); K_e es la conductividad hidráulica efectiva ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); ψ_{wf} es el potencial mátrico del frente de humedecimiento (mm); $\Delta\theta_v$ es el cambio en el contenido volumétrico de humedad a través del frente húmedo ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$) y $F_{inf,t}$ es la infiltración acumulada en el tiempo t (mm).

Cuando la intensidad de lluvia es menor que la tasa de infiltración, toda la lluvia se infiltra durante el periodo de tiempo y la infiltración acumulada para este periodo de tiempo se calcula con la ecuación 17.

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + R_{\Delta t} \quad (17)$$

Donde F_{inf} es la infiltración acumulada para un tiempo dado (mm), $F_{inf,t-1}$ es la infiltración acumulada para el lapso de tiempo previo (mm), y $R_{\Delta t}$ es la cantidad de lluvia que cae durante el lapso de tiempo (mm).

La tasa de infiltración definida por la ecuación 16, es una función de volumen infiltrado, el cual a su vez es una función de las tasas de infiltración en pasos de tiempo previos. Para evitar errores numéricos sobre pasos de tiempo prolongados, f_{inf} es reemplazada por dF_{inf}/dt en la ecuación 16 e integrada para obtener la ecuación 18:

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + K_e * \Delta t + \psi_{wf} * \Delta \theta_v * \ln \left[\frac{F_{inf,t} + \psi_{wf} * \Delta \theta_v}{F_{inf,t-1} + \psi_{wf} * \Delta \theta_v} \right] \quad (18)$$

La ecuación 18 debe resolverse iterativamente para la infiltración acumulada al final del paso del tiempo, empleando una técnica de sustitución sucesiva.

3.8.2.1. Parámetro de conductividad hidráulica efectiva

El parámetro de conductividad hidráulica efectiva K_e , es el equivalente aproximado a un medio de conductividad hidráulica saturada del suelo K_{sat} en $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Bouwer, 1969).

Nearing *et al.*, (1996) desarrollaron la ecuación para calcular la K_e como una función de la K_{sat} y CN . Esta ecuación incorpora los impactos de la cobertura del suelo dentro de los cálculos de la conductividad efectiva expresada en la ecuación 19.

$$K_e = \frac{56.82 * K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 * e^{(0.062 * CN)}} - 2 \quad (19)$$

Donde K_e es la conductividad hidráulica efectiva ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) y CN es el número de curva.

3.8.2.2. Parámetro de potencial mátrico

El potencial mátrico de frente húmedo ψ_{wf} , se calcula como una función de la porosidad, porcentaje de arena y arcilla (Rawls y Brakensick, 1985) expresado por la ecuación 20.

$$\psi_{wf} = 10e^{\frac{(6.5309 - 7.32561*\phi_{soil} + 0.001583*m_c^2 + 3.809479*\phi_{soil}^2 + 0.000344*m_s*m_c - 0.049837*m_s*\phi_{soil} + 0.001608*m_s^2*\phi_{soil}^2 + 0.001602*m_c^2*\phi_{soil}^2 - 0.0000136*m_s^2*m_c - 0.003479*m_c^2*\phi_{soil} - 0.000799*m_s^2*\phi_{soil})}{1}} \quad (20)$$

Donde ϕ_{soil} es la porosidad del suelo ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$); m_c es el porcentaje de contenido de arcilla; m_s es el porcentaje de contenido de arena; $\phi_{soil} = 1 - \rho_b / 2.65$; ρ_b es la densidad aparente en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

3.8.2.3. Cambio en el contenido de humedad

El cambio en el contenido de humedad volumétrica $\Delta\theta_v$ a través del frente húmedo se calcula al inicio de cada día por la ecuación 21.

$$\Delta\theta_v = \left(1 - \frac{SW}{FC}\right) * (0.95 * \phi_{soil}) \quad (21)$$

Donde $\Delta\theta_v$ es la cambio en el contenido de humedad volumétrica a través del frente de humedecimiento ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$); SW es el contenido de agua en el suelo en el perfil excluyendo la cantidad de agua retenida en el perfil en el punto de marchitez permanente (mm); FC es la cantidad de agua en el perfil del suelo a capacidad de campo (mm) y ϕ_{soil} es la porosidad del suelo ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$). Si un evento de lluvia esta en progreso a media noche, entonces $\Delta\theta_v$ es calculado en la ecuación 22

$$\Delta\theta_v = 0.001 * (0.95 * \phi_{soil}) \quad (22)$$

Para cada paso del tiempo, SWAT calcula la cantidad de agua que entra al suelo. El agua que no se infiltra en el suelo se convierte en escurrimiento.

3.8.3. Comparación del método de número de curva (CN) y el de Green & Ampt

Ficklin *et al.*, (2012) mencionan que en SWAT, las estimaciones del modelo de Green & Ampt están en función de la cantidad de infiltración, asumiendo que el restante de la precipitación se convertirá en escorrentía superficial, en el Cuadro 3 se muestran las diversas características de cada uno de los métodos.

Cuadro 3. Comparación del método de número de curva vs Green & Ampt.

Factores	Enfoque	
	Número de Curva	Green & Ampt
Precipitación	Monto de precipitaciones	Intensidades de lluvia o distribución de lluvia
Suelo	Condición de humedad antecedente.	Almacenamiento antecedente del suelo (volumen) por suelos y por capas de profundidad del suelo.
	Grupo hidrológico de suelos.	Propiedades del agua del suelo por capas o la profundidad del suelo (densidad, conductividad saturada y potencial mátrico).
Cubertura	Uso del suelo.	Influencias de labranza sobre las propiedades del suelo
	Prácticas de manejo. Condiciones hidrológicas.	Uso del suelo e influencias de las prácticas de manejo sobre las propiedades de este. Cobertura del suelo y factores que influyen en las propiedades superficiales del suelo.
Infiltración	Abstracción inicial I_a es asumida como 0.2 (S)	La infiltración total antes de salir a la superficie.
Superficie	Incluido con la abstracción inicial I_a	Almacenamiento en la superficie del suelo estimado como la influencia de la topografía, uso del suelo y labranza
Intercepción	Incluida con la abstracción inicial I_a	Estimada por la cobertura del suelo (en vivo y / o mantillo)

Fuente: Ficklin *et al.*, (2012).

3.9. Erosión

El proceso de erosión consiste en tres etapas: el primero, se refiere al desprendimiento de las partículas individuales de la masa del suelo por el viento o agua; el segundo consiste en el transporte de éstas mediante el escurrimiento y por el viento y; cuando éste no se presenta ocurre el tercero que es la sedimentación (Figueroa *et al.*, 1991).

Martínez *et al.*, (2001) mencionan que la producción de sedimentos puede ser un indicador del impacto de los cambios de usos de suelo en las áreas de drenaje de las cuencas y de las modificaciones en los sistemas de drenaje que originan los incrementos en las tasas de degradación.

Neitsch *et al.*, (2011) indican que la erosión y la producción de sedimentos son estimadas para cada HRU con la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) (Williams, 1975). Mientras USLE utiliza la lluvia como un indicador de la energía de erosión, MUSLE utiliza la cantidad de escurrimiento para simular la erosión y la producción de sedimentos. La sustitución resulta en varios beneficios: la certeza de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y la producción de sedimentos puede ser calculada para una sola tormenta. El modelo de hidrología suministra estimaciones del volumen de escurrimiento y la tasa pico de escurrimiento, que con el área de la subcuenca, son usadas para calcular la variable de energía de erosión del escurrimiento. El factor de manejo de cultivos se calcula nuevamente cada día que el escurrimiento ocurre, es una función de la biomasa en la superficie, de los residuos, y el factor C mínimo para las plantas. Otros factores de la ecuación son evaluados y descritos por Wischmeier y Smith (1978).

3.9.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (por sus siglas en el idioma inglés USLE) fue desarrollada por Wischmeier y Smith (1965, 1978), y la que utiliza en SWAT es expresada por (Williams, 1995) en la ecuación 23.

$$sed = 1.292 * EI_{USLE} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad (23)$$

Donde *sed* es la producción de sedimento en un día dado ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$); EI_{USLE} es el índice de erosión de la lluvia ($0.017 \text{ m} \cdot \text{ton} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); K_{USLE} es el factor de erodabilidad del

suelo ($0.013 \text{ ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$); C_{USLE} es el factor de cobertura del suelo; P_{USLE} es el factor de práctica de manejo; LS_{USLE} es el factor topográfico y $CFRG$ es el factor de fragmento macro. Los parámetros antes mencionados se describen a detalle en el manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

3.9.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)

El modelo SWAT simula la producción de sedimentos a nivel de cada HRU, empleando la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (por sus siglas en el idioma inglés MUSLE) (Williams, 1995), MUSLE es la versión modificada de la USLE (Universal Soil Loss Equation).

USLE predice el promedio de la erosión total anual, como una función de la energía de la lluvia. En MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), el factor de energía de la lluvia se sustituye con un factor del escurrimiento. Esto mejora la predicción de producción de sedimentos, elimina la necesidad de relaciones de distribución, y permite que la ecuación sea aplicada a eventos individuales de tormenta. La predicción de producción de sedimentos se mejora porque los escurrimientos son una función de la condición previa de humedad, así como la energía de la lluvia.

Las proporciones de entrega (producción de sedimento en cualquier punto a lo largo del cauce dividido por la fuente de erosión sobre ese punto) son requeridas por el USLE, porque el factor de lluvia representa la energía utilizada en la separación partículas. Las proporciones de entrega no son necesarias con MUSLE porque el factor de escurrimiento representa la energía usada en la separación y transporte de sedimento (Neitsch *et al.*, 2011).

La ecuación universal modificada de pérdida de suelo (Williams, 1995) se expresa en la ecuación 24, que indica la producción de sedimentos en un día dado en toneladas.

$$sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad (24)$$

Donde Q_{surf} es el volumen de escurrimiento superficial ($mm \cdot ha^{-1}$); q_{peak} es el escurrimiento máximo ($m^3 \cdot s^{-1}$); $area_{hru}$ es el área de la HRU (ha).

El escurrimiento máximo q_{peak} es un indicador del poder erosivo de un evento de lluvia y es calculado usando la fórmula racional modificada, expresada en la ecuación 25:

$$q_{peak} = \frac{Q_{surf} * area * \alpha_{tc}}{3.6 * t_{conc}} \quad (25)$$

Donde q_{peak} es el escurrimiento máximo ($m^3 \cdot s^{-1}$); α_{tc} es la fracción de lluvia diaria que ocurre durante el tiempo de concentración; Q_{surf} es el escurrimiento superficial (mm); 3.6 es un factor de conversión y t_{conc} es el tiempo de concentración en horas. El tiempo de concentración (ecuación 26) es calculado sumando el tiempo de flujo superficial (t_{ov}) y el tiempo de flujo del canal (t_{ch}):

$$t_c = t_{ov} + t_{ch} \quad (26)$$

Donde t_{ov} se obtiene de la ecuación 27, en la que L_s es la longitud de la pendiente de la cuenca o subcuenca (m); n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional) y t_{ch} , de la ecuación 28, en la que L_c es la longitud del cauce principal en la cuenca (km) y v_c es la velocidad promedio del flujo en el cauce ($m^3 \cdot s^{-1}$); 3.6 es un factor de conversión.

$$t_{ov} = \frac{L_s^{0.6} * n^{0.6}}{18 * n^{0.3}} \quad (27)$$

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 * v_c} \quad (28)$$

Para obtener una mayor información y detalle acerca de las variables y procesos hidrológicos en la cuenca, se recomienda consultar el manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

3.9.3. Transporte de agua y sedimentos en el cauce principal

Neitsch *et al.*, (2011) mencionan que el transporte de agua y sedimentos en el cauce principal se divide de la siguiente manera:

- Transporte de agua: cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión a través del lecho del río. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del cauce para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el cauce y/o adicionado por medio de descargas de aguas residuales. El flujo que es dirigido a través del cauce es estimado por los métodos de coeficiente de variable de almacenamiento (Williams, 1969) o el método de Muskingum (Campos, 1998).
- Transporte de sedimentos: el transporte de sedimentos en el cauce principal es controlado por simultáneas operaciones de dos procesos: deposición y degradación. Las versiones anteriores del SWAT usaron la fuerza de la corriente para estimar la deposición/degradación en los cauces (Arnold *et al.*, 1995). Bagnold (1977) definió la fuerza de la corriente como el producto de la densidad del agua, proporción del flujo y pendiente de la superficie del agua. Williams (1980) usó la definición de Bagnold de la fuerza de corriente para desarrollar un método para determinar la degradación como una función de la pendiente del cauce y velocidad. En la versión actual de SWAT, las ecuaciones han sido simplificadas y la cantidad máxima de sedimento que puede ser transportada para un segmento del río, es una función de la velocidad pico del canal; el exceso de la fuerza de la corriente causa degradación. La degradación del lecho del río es ajustada por la erodabilidad del mismo y la cobertura vegetal.

3.10. Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad es el proceso de determinación de la tasa de cambio en la salida del modelo con respecto a los cambios los parámetros de entrada del modelo.

El análisis de sensibilidad es un proceso necesario para identificar los parámetros clave y la precisión de los mismos, requeridos para la calibración (Ma *et al.*, 2000).

Dentro del programa SWAT-CUP, se menciona dos estrategias a elegir para el análisis de sensibilidad:

- Análisis de sensibilidad individual
- Análisis de sensibilidad global

El análisis de sensibilidad individual "one at a time" muestra la sensibilidad de una variable en un parámetro si todos los demás se mantienen constantes en algún valor.

El problema aquí es que nunca se sabe lo que debería ser el valor de los otros parámetros constantes (Abbaspour, 2012).

Abbaspour (2012) refiere que el análisis de sensibilidad global de los parámetros es determinado mediante el cálculo del siguiente sistema de regresión múltiple, el cual regresa los parámetros generados por el la función de hipercubo latino (Mckay *et al.*, 1976) contra los valores de la función objetivo representados en las ecuaciones 29, 30 y 31:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (29)$$

Donde g es la función optimización de la función objetivo (multiplicación, suma, R^2 , Chi^2 , NSE, etc.), m representa los datos medidos, b es el parámetro evaluado.

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_m} \quad (30)$$

Donde σ_s es la desviación estándar de los datos simulados y σ_m es la desviación estándar de los datos medidos.

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_m} \quad (31)$$

Donde μ_s es la media de los valores simulados y μ_m es la media de los valores medidos.

Las sensibilidades dadas son estimaciones de las tasas medias de variación en la función objetivo, como resultado de los cambios en cada parámetro, mientras que todos los parámetros están cambiando (Abbaspour, 2012).

Una prueba de t se utiliza entonces para identificar la significancia relativa de cada parámetro b_i . Las sensibilidades dadas anteriormente son estimaciones de las tasas medias de variación en la función objetivo, como resultado de los cambios en cada parámetro, mientras que todos los demás parámetros están cambiando. Esto da sensibilidades relativas basadas en aproximaciones lineales y, por lo tanto, solamente proporciona información parcial acerca de la sensibilidad de la función objetivo para los parámetros del modelo.

3.10.1. t-stat y p-valúe

Abbaspour (2012) indica que en la sensibilidad global, un análisis de regresión múltiple se utiliza para obtener las estadísticas de sensibilidad de los parámetros. El t-stat es el coeficiente de un parámetro dividido por su error estándar. Es una medida de la precisión con la que se mide el coeficiente de regresión. Se podría comparar el t-stat de un parámetro con los valores de la tabla de distribución t-student para determinar el p-valúe, que es el número que realmente necesita ser observado. La distribución t-student describe cómo la media de una muestra se comporta con un cierto número de observaciones.

El p-valúe para cada término pone a prueba la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a cero (sin efecto). Un bajo p-valúe (< 0.05) indica que se puede rechazar la hipótesis nula. En otras palabras, una predicción que tiene bajo valor de p-valúe es probable que sea una adicción significativa al modelo, ya que los cambios en el valor de predicción están relacionados con los cambios en la variable de respuesta. A la inversa, un p-valúe más grande sugiere que los cambios en el predictor no están asociados con cambios en la respuesta, por lo que el parámetro no es muy sensible.

3.11. Calibración del modelo

La calibración del modelo es el proceso de estimar sus parámetros mediante la comparación de sus predicciones (de salida) para un conjunto dado de condiciones contraídas con los datos observados para las mismas condiciones (Moriassi *et al.*, 2007).

La calibración de un modelo consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos observados y los datos estimados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aún de aquellos considerados conocidos; mientras que, la validación es una medición de la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de los valores calculados y observados, siempre y cuando estos últimos no hayan sido tomados en cuenta en el proceso de calibración, puesto que de otra forma sólo se estaría midiendo la bondad de dicha calibración y no el poder predictivo del modelo (Palacios, 1986).

Un modelo es considerado "bueno" mientras los valores estimados se acerquen más a la línea de tendencia 1:1 y los puntos de observación se distribuyan uniformemente sobre la misma línea 1:1, dicho de otra manera, se considera que se ha desarrollado un buen modelo cuando los valores obtenidos con el modelo de predicción presentan un comportamiento similar a los valores que se han obtenido en el campo y que representan

las condiciones reales (IBSNAT, 1985). En la modelación de cuencas la calibración es posiblemente el paso más demandante en la creación de un modelo preciso.

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures) es un programa independiente desarrollado para la calibración SWAT. El programa contiene cinco diferentes procedimientos de calibración e incluye funcionalidades para la validación y el análisis de sensibilidad, así como visualizaciones del área de estudio (Abbaspour *et al.*, 2007).

El modelo SWAT incluye un gran número de parámetros que describen las diferentes condiciones hidrológicas y las características de toda la cuenca. Durante un proceso de calibración, los parámetros del modelo están sujetos a ajustes, con el fin de obtener los resultados del modelo que correspondan mejor a las tasas de descarga observadas en campo (Stehr *et al.*, 2008). El rango de valores de los parámetros utilizados en el proceso de calibración deben estar físicamente plausibles (Eckhardt *et al.*, 2005), por lo que el modelo se puede aplicar después para evaluar el impacto de escenarios de cambio y opciones de manejo (Stehr *et al.*, 2008).

3.12. Evaluación del modelo

Gassman *et al.*, (2007) mencionan que la mayoría de las aplicaciones SWAT reportan algún tipo de calibración hidrológica gráfica y/o estadística, especialmente para el caudal de la corriente, y muchos de los estudios también reportan resultados de validación.

Se ha utilizado una amplia gama de estadísticas para evaluar las predicciones hidrológicas SWAT. De lejos, las estadísticas más utilizadas para la calibración y validación hidrológicas son el coeficiente de regresión (R^2) y coeficiente de eficiencia del modelo Nash - Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970).

El valor de R^2 mide cuán bien la línea de regresión simulada versus la observada se aproxima a una coincidencia ideal y oscila de 0 a 1; un valor de 0 indica ninguna

correlación y un valor de 1 representa que la dispersión simulada es igual a la dispersión medida (Krause *et al.*, 2005).

La pendiente de regresión y la intersección también son iguales a 1 y 0, respectivamente para un ajuste perfecto; la pendiente y la intercepción a menudo no se informan. Gassman *et al.*, (2007)

El Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) o también conocido como Índice de Nash es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de los datos de medición ("información") (Nash y Sutcliffe, 1970). Moriasi *et al.*, (2007) refieren al respecto que el NSE indica qué tan bien el conjunto de datos observados frente a los datos simulados se ajusta a la línea 1: 1, expresado en la ecuación 32.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (32)$$

Donde Y_i^{obs} es la *i*-ésima observación para el componente que se está evaluando; Y_i^{sim} es el *i*-ésimo valor simulado para el componente que está siendo evaluado; Y^{mean} es la media de los datos observados para el componente que se está evaluando y n es el número total de observaciones. El NSE oscila entre $-\infty$ y 1.0 (1 inclusive), siendo el $NSE = 1$ el valor óptimo. Valores comprendidos entre 0.0 y 1.0 son vistos generalmente como los niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores < 0.0 indica que la media del valor observado es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un desempeño inaceptable, como se representa en el Cuadro 4.

El NSE se recomienda para su uso por ASCE (1993) y Legates y McCabe (1999) dentro de los modelos hidrológicos. Se utiliza con mucha frecuencia, lo que proporciona una amplia información sobre los valores reportados, un resumen se expresa en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE).

Rango de desempeño	NSE
Muy bueno	$0.75 < \text{NSE} \leq 1$
Bueno	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$
Insatisfactorio	$\text{NSE} \leq 0.50$

Fuente: Moriasi *et al.* (2007).

Cuadro 5. Resumen de estadísticas de la revisión de literatura del NSE.

Constituyente	Estadística	Calibración		Validación	
		Diaria	Mensual	Diaria	Mensual
Gasto	<i>n</i>	92.00	33.00	128.00	70.00
	Mínimo	-0.23	0.14	-1.81	-3.35
	Máximo	0.95	0.91	0.89	0.83
	Media	0.89	0.79	0.67	0.63
Escurrimiento superficial	<i>n</i>	0.00	2.00	0.00	2.00
	Mínimo	N/D	0.35	N/D	0.63
	Máximo	N/D	0.62	N/D	0.77
	Media	N/D	0.49	N/D	0.70
Sedimento	<i>n</i>	2.00	6.00	2.00	6.00
	Mínimo	-2.50	0.49	-3.51	-2.46
	Máximo	0.11	0.86	0.23	0.88
	Media	-1.20	0.76	-1.64	0.64

Fuente: Moriasi *et al.*, (2007); N/D: Dato no disponible.

3.13. Validación del modelo

La validación del modelo implica la ejecución del mismo usando los parámetros de entrada medidos o determinados durante el proceso de calibración (Moriasi *et al.*, 2007).

La validación del modelo es el proceso de demostrar que un modelo dado es capaz de hacer simulaciones "suficientemente precisas", aunque el criterio puede variar en función de los objetivos del proyecto.

El análisis de incertidumbre se define como el proceso de cuantificar el nivel de confianza en una salida de la simulación de un modelo determinado sobre la base de:

- a) La calidad y cantidad de los datos medidos disponibles.
- b) La ausencia de datos medidos debido a la falta de vigilancia en ciertas ubicaciones.
- c) La falta de conocimiento acerca de algunos procesos físicos y procedimientos operativos.
- d) La naturaleza aproximada de las ecuaciones matemáticas que se utilizan para simular los procesos.
- e) La calidad de los análisis de sensibilidad del modelo y de calibración.

Para cuantificar el ajuste entre el resultado de la simulación expresada como 95PPU (95% de incertidumbre de predicción), y la observación expresada como una única señal (con un poco de error asociado con él). Se ejecutaron dos estadísticas: factor-p y factor-r; el factor-p es el porcentaje de datos observados con la envoltura en nuestro resultado modelado (95PPU), el factor-r es el espesor medio de la banda de incertidumbre de 95PPU dividida por la desviación estándar. No existe un número duro de lo que estos factores deben ser, al igual que no existen cifras concretas para R^2 o NSE en el cual estos últimos cuanto más grandes son mejor.

La bondad de ajuste y el grado en que las cuentas del modelo calibrado para las incertidumbres son evaluadas por las medidas factor-p y factor-r. Teóricamente, el valor del factor-p oscila entre 0 y 100%, mientras que el factor-r varía de cero al infinito. Un factor-p de 1 y factor-r de cero es una simulación que corresponde exactamente a los datos medidos. El grado en que estemos lejos de estas cifras se puede utilizar para juzgar la fuerza de nuestra calibración (Abbaspour, 2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Localización geográfica

La cuenca del río Yautepec se encuentra dentro de las coordenadas geográficas $19^{\circ} 10' 10''$ y $18^{\circ} 43' 15''$ de latitud norte; $99^{\circ} 10' 0.0''$ y $98^{\circ} 37' 0.0''$ de longitud oeste, abarcando una superficie de 965.37 km^2 ; comprende 21 municipios de los estados de Morelos, Estado de México y Ciudad de México (Figura 6).

El modelo hidrológico de la cuenca se definió y calibró hasta la estación hidrométrica número 18223 “Ticumán” ubicada sobre el cauce del río Yautepec, en las coordenadas $18^{\circ} 47' 42.48'' \text{ N}$ y $99^{\circ} 06' 16.44'' \text{ O}$, a una altitud de 1,154 m, contando con datos de escurrimientos del año 1953 al 2011 y de sedimentos de los años 1980 a 1985.



Figura 6. Localización geográfica de la cuenca del río Yautepec.

4.1.2. Hidrografía

La cuenca del río Yautepec es una cuenca exorreica, se encuentra ubicada en la Región hidrológica 18 río Balsas, Subregión hidrológica Medio Balsas, formando parte del río Amacuzac. El río Yautepec (Figuras 7, 8 y 9), cuyo cauce principal nace en las faldas del Volcán Popocatepetl en el lugar conocido con el nombre de cañada Nexpayantla; cruza el poblado de Ozumba en el Estado de México, donde toma el nombre de barranca El Salto y es a partir de Oaxtepec que se le conoce como río Yautepec; clasificada por su tamaño de acuerdo a Campos (1998) en una cuenca intermedia-grande.



Figura 7. Vista aguas arriba del río Yautepec en el municipio de Atlatlahucan, Mor.



Figura 8. Vista aguas arriba del río Yautepec en el municipio de Yautepec, Mor.



Figura 9. Vista aguas arriba del río Yautepec en la estación hidrométrica Ticumán.

4.1.3. Fisiografía

La cuenca del río Yautepec se encuentra dentro de las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, en las subprovincias fisiográficas Lagos y Volcanes del Anáhuac (87.32 %) y Sierras y Valles Guerrerenses (12.68 %) (INEGI, 2001a) (Figura 10).

4.1.4. Geología

De acuerdo con la carta geológica escala 1:1,000,000 (INEGI, 2002), dentro de la cuenca de estudio se encuentran los tipos de rocas que se muestran el Cuadro 6 y Figura 11.

Cuadro 6. Tipos de rocas presentes en la cuenca de estudio.

Tipo	Área de la cuenca (%)
Ígnea extrusiva básica	66.52
Ígnea extrusiva ácida	0.63
Volcanoclástico	1.40
Arenisca-conglomerado	0.58
Brecha sedimentaria	2.86
Caliza	9.59
Lutita-arenisca	0.13
Conglomerado	3.05
Material aluvial	15.25

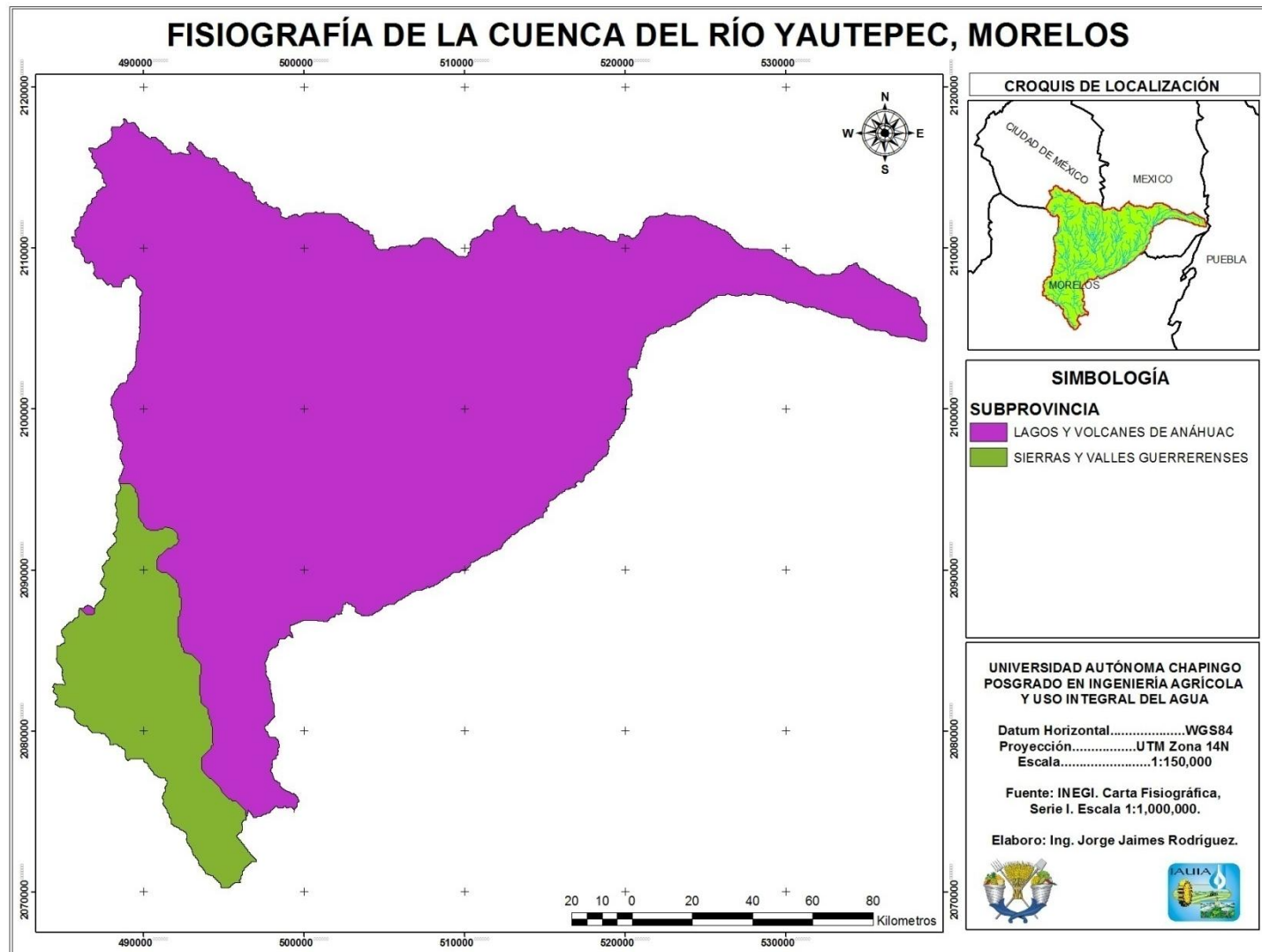


Figura 10. Fisiografía de la cuenca de estudio.

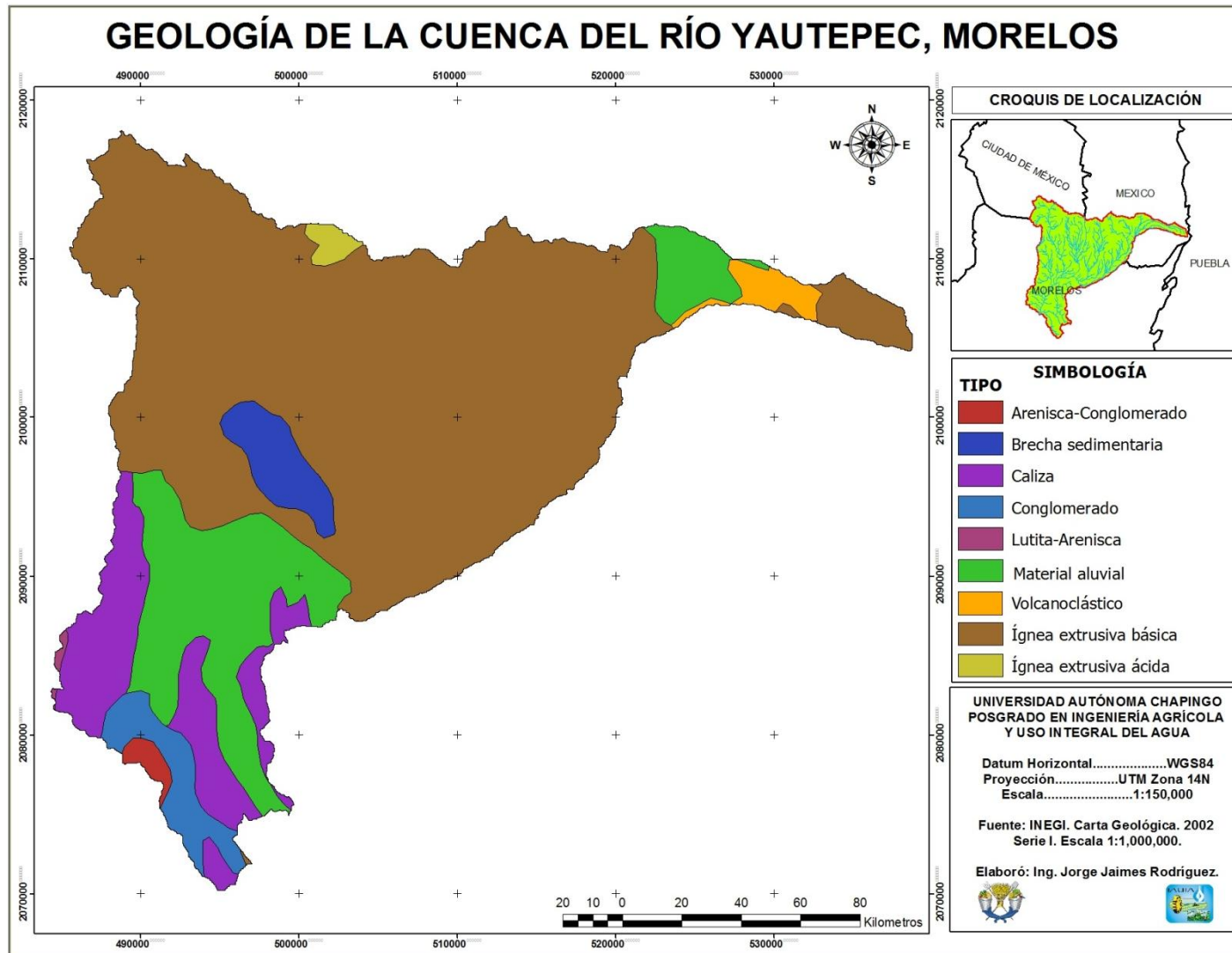


Figura 11. Tipos de rocas presentes en la cuenca de estudio.

4.1.5. Clima

Según carta climática, escala 1:1,000,000 INEGI (2008), la cuenca se encuentra dentro de una zona de transición climática, por lo que se presentan varios subtipos climáticos (Cuadro 7 y Figura 12).

Cuadro 7. Tipos de climas presentes en la cuenca de estudio.

Clave	Clima	Área de la cuenca (%)
Aw ₀ (w)	Cálido subhúmedo con lluvias en verano ³	19.14
C(w ₂)(w)	Templado subhúmedo con lluvias en verano ¹	35.53
C(E)(w ₂)(w)	Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	15.09
C(E)(m)(w)	Semifrío húmedo con lluvias en verano	1.05
E(T)H	Muy frío subhúmedo con lluvias en verano ¹	0.19
A(C)w ₁ (w)	Semicálido subhúmedo con lluvias en verano ²	27.79
A(C)w ₀ (w)	Semicálido subhúmedo con lluvias en verano ³	1.21

Fuente: Elaboración propia con datos de cartografía de INEGI, clasificación climática de Köppen modificada por García (1973).

¹De los más húmedos de los subhúmedos.

²Intermedio en cuanto al grado de humedad.

³El más seco de los subhúmedos.

4.1.6. Suelos

Según las cartas edafológicas E14-5 y E14-2, Escala 1:250,000 (INEGI, 1983a; INEGI, 1983b), dentro de la cuenca de estudio se encuentran los siguientes tipos de suelos que se indican en el Cuadro 8 y Figura 13.

Cuadro 8. Tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio.

Tipo de suelos	Área de la cuenca (%)
Fluvisol	2.50
Regosol	12.30
Litosol	18.76
Andosol	27.11
Cambisol	5.16
Vertisol	14.77
Feozem	6.81
Rendzina	12.59

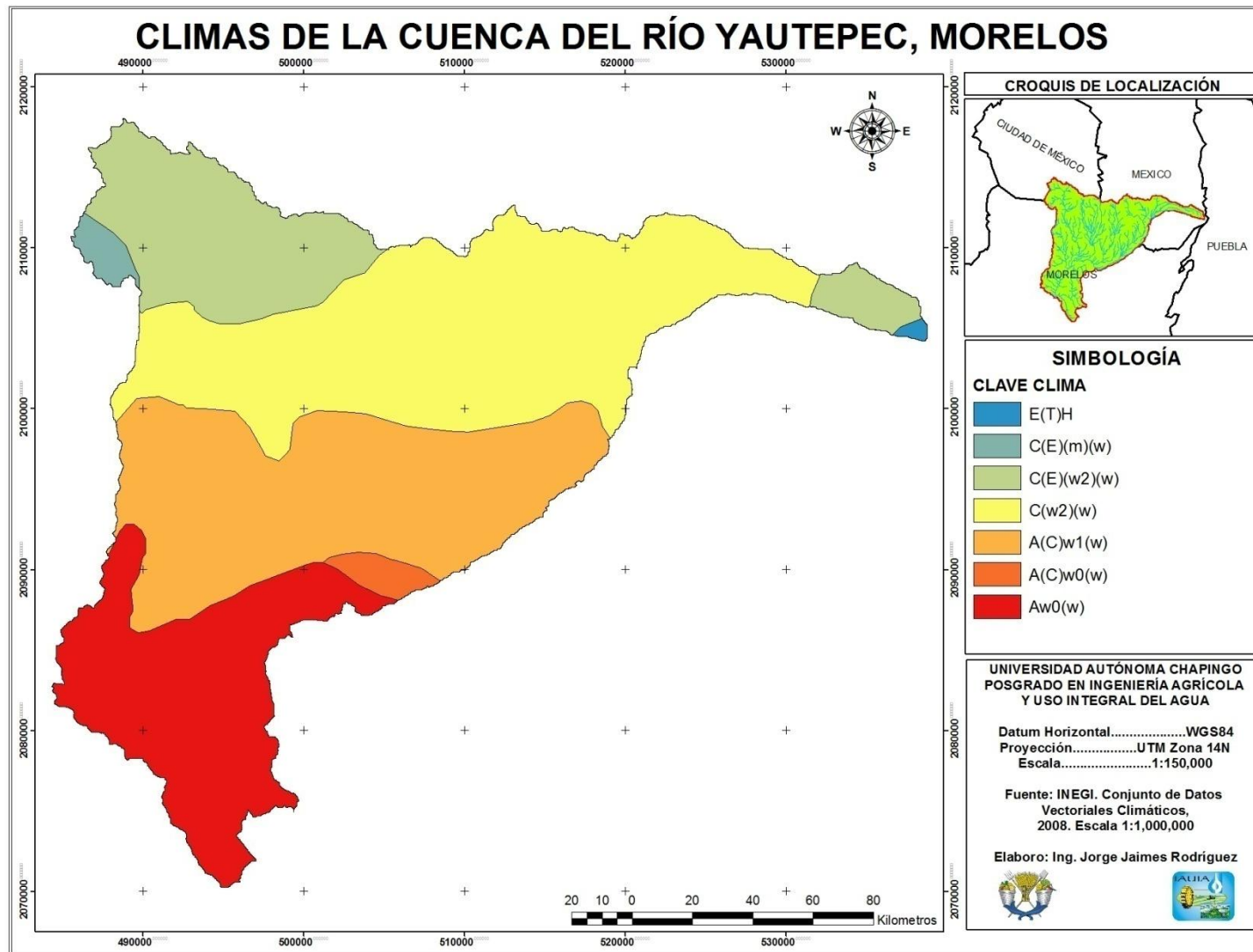


Figura 12. Tipos de climas presentes en la cuenca de estudio.

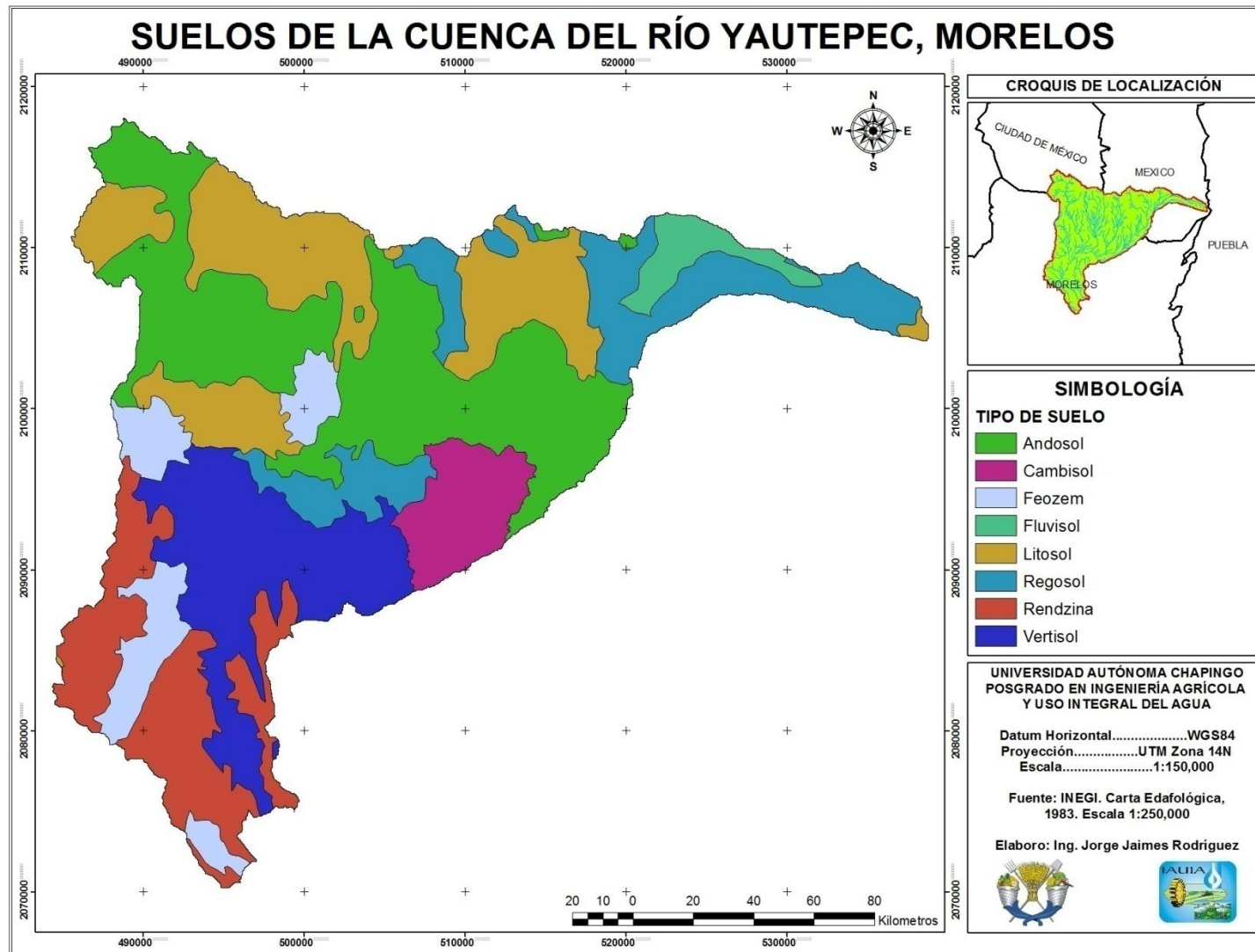


Figura 13. Tipos de suelos presentes en la cuenca de estudio.

4.1.7. Uso del suelo y vegetación

Se analizaron las series I y IV de uso de suelo y vegetación debido a que se simularon en SWAT dos periodos: 1976 a 1985 y 2002 a 2011. Para el primer periodo se tomó información de las cartas de la serie I, E14-5 y E14-2, Escala 1:250,000 (INEGI, 1984a; INEGI, 1984b); para el segundo periodo de 2002 a 2011, se utilizó la serie IV (INEGI, 2010a). Se identificaron 13 tipos de uso de suelo y vegetación dentro de la cuenca (Cuadros 9 y 10 y Figuras 14 y 15).

Cuadro 9. Uso de suelo y vegetación de la serie I de INEGI, presentes en la cuenca de estudio.

Uso del suelo y vegetación	Clave	(% del área total)
Agricultura de riego	AR	8.82
Agricultura de temporal	AT	42.32
Bosque de encino	BQ	4.77
Bosque de encino-pino	BQP	1.59
Bosque de pino-encino	BPQ	1.02
Bosque mesófilo de montaña	BM	2.86
Bosque de abies	BA	2.79
Bosque de pino	BP	13.19
Pastizal inducido	PI	6.90
Pradera de alta montaña	VW	0.40
Selva baja caducifolia	SBC	14.45
Área sin vegetación	SV	0.37
Zona urbana	ZU	0.53

Cuadro 10. Uso del suelo y vegetación de la serie IV de INEGI presentes en la cuenca de estudio.

Uso del suelo y vegetación	Clave	(% del área total)
Agricultura de riego	AR	8.00
Agricultura de temporal	AT	45.63
Bosque de encino	BQ	2.92
Bosque de encino-pino	BQP	2.65
Bosque de pino-encino	BPQ	11.87
Bosque mesófilo de montaña	BM	1.81
Bosque de abies	BA	2.47
Bosque de pino	BP	2.06
Pastizal inducido	PI	4.45
Pradera de alta montaña	VW	13.00
Selva baja caducifolia	SBC	0.38
Área sin vegetación	SV	0.33
Zona urbana	ZU	4.40

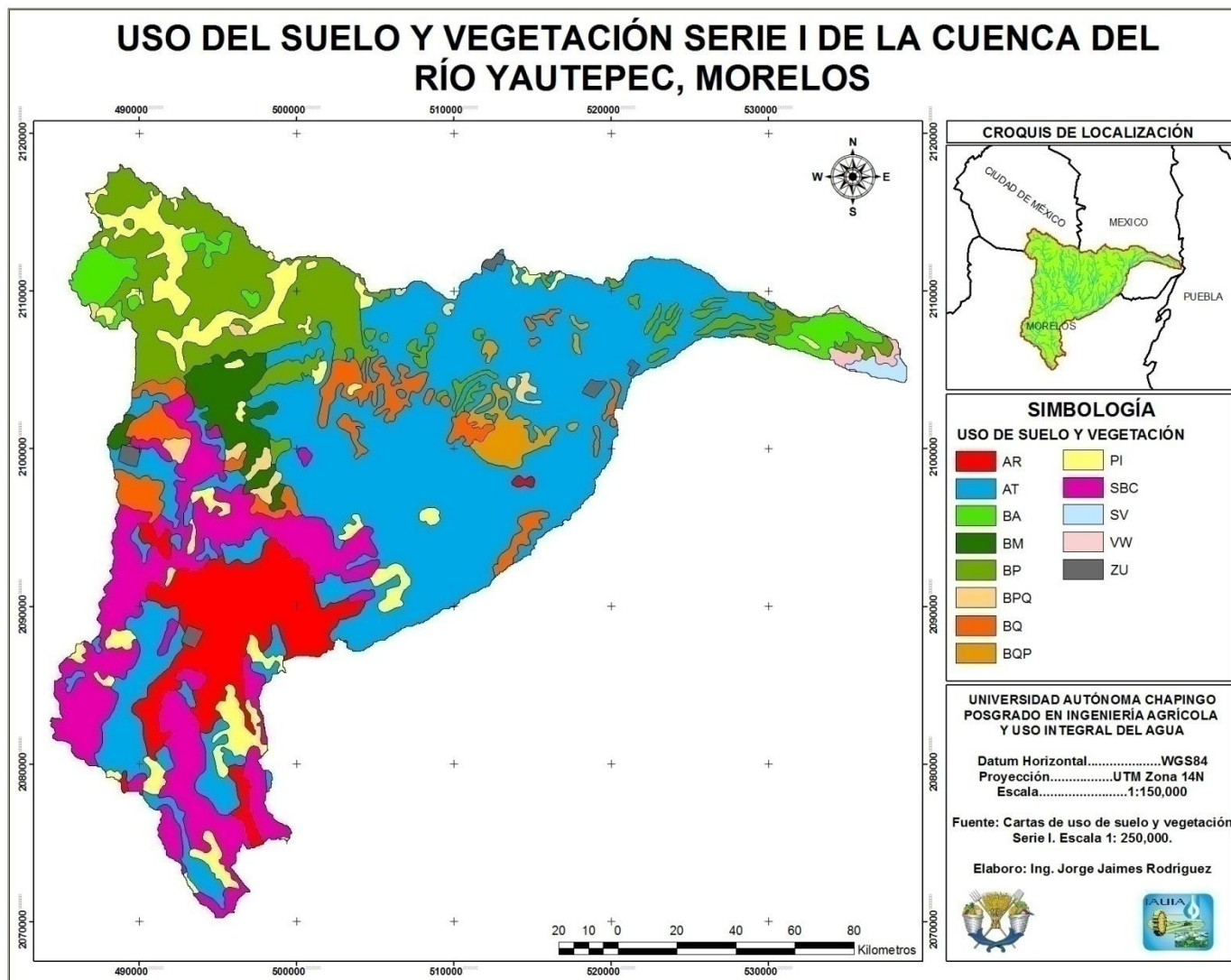


Figura 14. Uso del suelo y vegetación, serie I, de la cuenca de estudio.

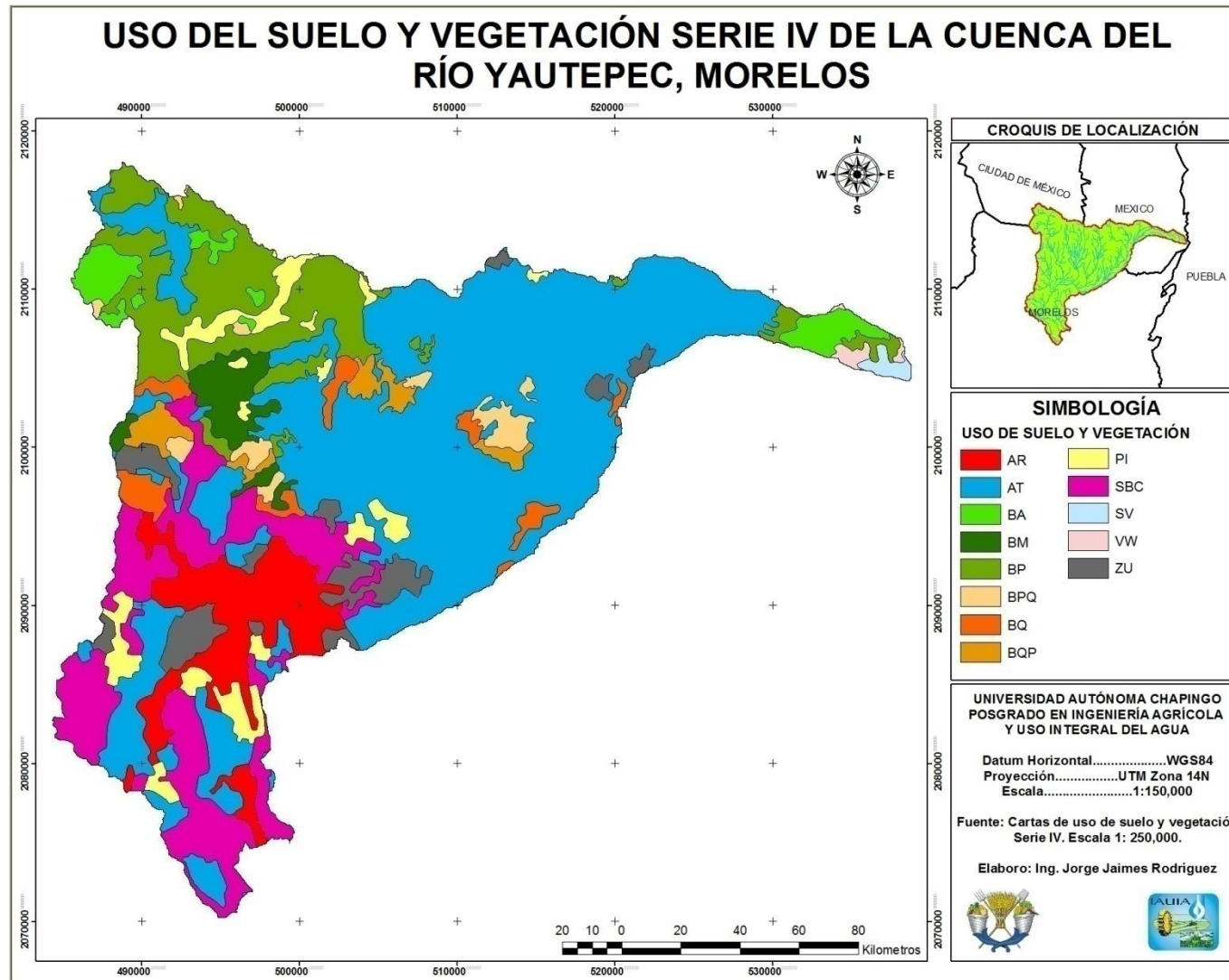


Figura 15. Uso del suelo y vegetación, serie IV, de la cuenca de estudio.

Con la información anterior del uso del suelo y vegetación en las diferentes épocas, se realizó un análisis de los cambios de uso de suelo del periodo 1984 a 2013 comparando el cambio en el porcentaje de la superficie total en la cuenca (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de los usos del suelo de las series I, IV de INEGI.

Uso del suelo y vegetación	Serie I INEGI (% del área total de la cuenca)	Serie I INEGI (ha)	Serie IV INEGI (% del área total de la cuenca)	Serie IV INEGI (ha)	% Cambio Serie I vs Serie IV
Agricultura de riego	8.82	8,514.56	8.00	7,722.96	- 0.82
Agricultura de temporal	42.32	40,854.46	45.66	44,078.79	+ 3.34
Bosque de abies	2.79	2,693.38	2.92	2,818.88	+ 0.13
Bosque mesófilo	2.86	2,760.96	2.65	2,558.23	- 0.21
Bosque de pino	13.19	12,733.23	11.87	11,458.94	- 1.32
Bosque de pino-encino	1.02	984.68	1.81	1,747.32	0.79
Bosque de encino	4.77	4,604.81	2.47	2,384.46	- 2.30
Bosque de encino - pino	1.59	1,534.94	2.06	1,988.66	+ 0.47
Pastizal inducido	6.90	6,661.05	4.45	4,295.90	- 2.45
Selva baja caducifolia	14.45	13,949.60	13.00	12,549.81	-1.45
Área sin vegetación	0.37	357.19	0.38	366.84	+ 0.01
Vegetación de alta montaña	0.39	376.49	0.33	318.57	- 0.06
Zona urbana	0.53	511.65	4.40	4,247.63	+ 3.87

Se advierte en el cuadro anterior, que la zona urbana y la agricultura de temporal han incrementado su superficie en el lapso aproximado de 30 años entre la serie I y IV, asimismo se ha incrementado el área que abarca la vegetación de pino - encino. Cabe mencionar que la vegetación de pastizal inducido y bosque de encino son grupos que más han reducido su superficie.

En general los tipos de vegetación forestal han sido afectados en su superficie en la cuenca, incrementándose los usos de suelo correspondientes a la agricultura de temporal y el uso urbano, este último afectado por el crecimiento poblacional a lo largo de casi 30

años. En la Figura 16 se muestra el comportamiento de los usos del suelo y vegetación de las series I, IV de INEGI.

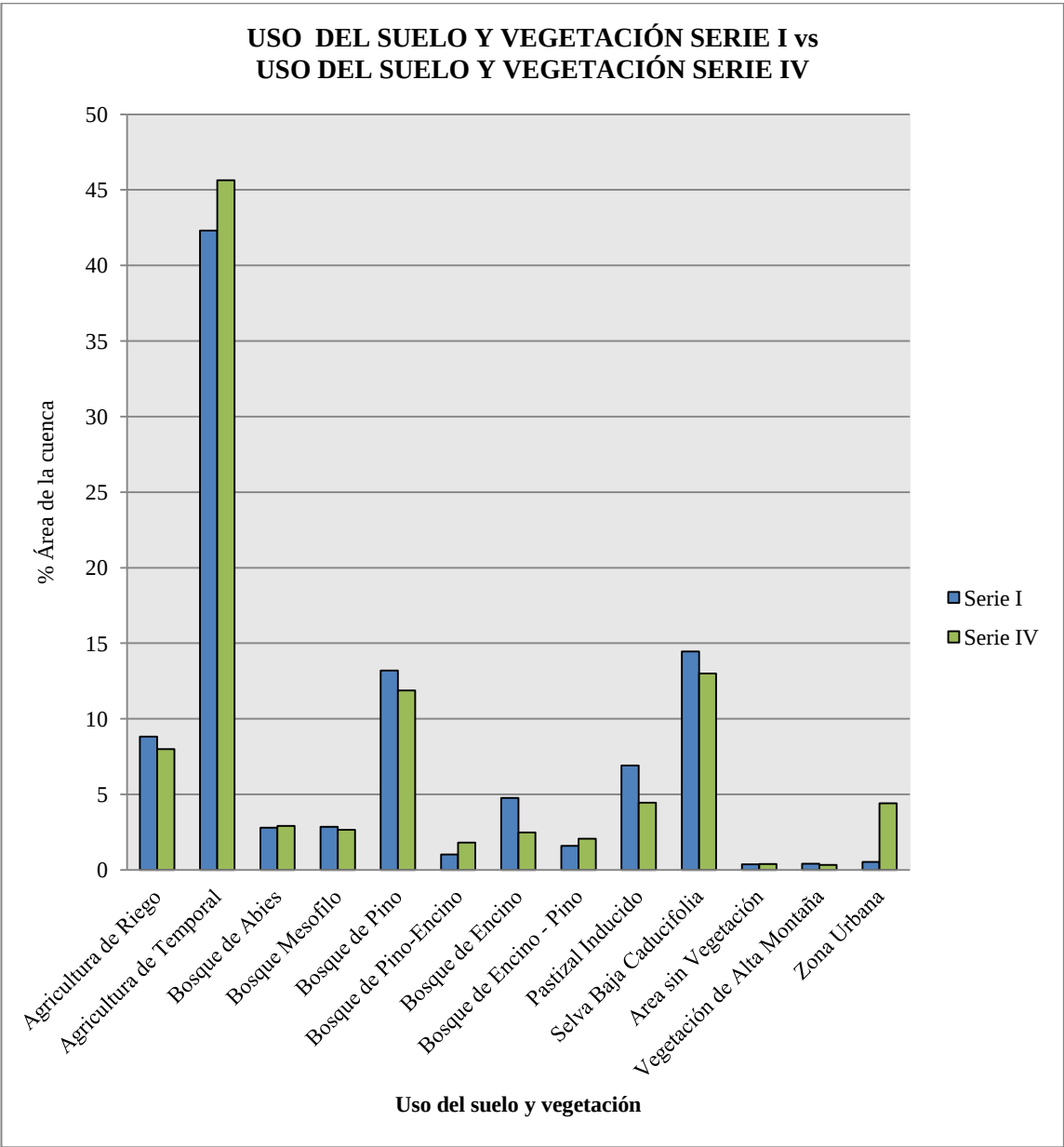


Figura 16. Comparación de los usos del suelo en la cuenca de estudio.

4.1.8. Población

La zona de estudio es una cuenca interestatal que cubre 21 municipios de los estados de Morelos, Estado de México y Ciudad de México (INEGI, 2006; INEGI, 2010c) (Figura 17), estando presentes dentro de los límites geográficos de la cuenca, 152 localidades (INEGI, 2010b). En el Cuadro 12 muestra la población existente dentro de la cuenca de acuerdo con los censos de población y vivienda de INEGI de los años 1980 y 2010 (INEGI, 1981; INEGI, 2011).

Cuadro 12. Municipios presentes en la cuenca de estudio y población.

Municipio	Estado	Población 1980* (hab)	Población 2010* (hab)
Amecameca	Estado de México	4,035	6,178
Atlatlahucan	Morelos	9,921	17,877
Atlautla	Estado de México	4,084	9,297
Ayala	Morelos	†	9
Ayapango	Estado de México	†	†
Cuautla	Morelos	617	871
Emiliano Zapata	Morelos	†	†
Huitzilac	Morelos	†	†
Jiutepec	Morelos	4,171	7,509
Juchitepec	Estado de México	12,664	23,120
Milpa Alta	Ciudad de México	†	†
Ozumba	Estado de México	12,271	22,848
Tepetlixpla	Estado de México	6,485	18,327
Tepoztlán	Morelos	11,556	25,157
Tlalnepantla	Morelos	3,978	6,636
Tlalpan	Ciudad de México	†	†
Tlaltizapán	Morelos	498	1,036
Tlayacapan	Morelos	8,578	16,543
Totolapan	Morelos	5,498	10,789
Yautepec	Morelos	37,764	83,913
Yecapixtla	Morelos	†	†
Total		215,391	250,101

*Elaboración propia con datos del censo de población y vivienda (INEGI, 1981; INEGI, 2011).

† No cuenta con población dentro de la cuenca.

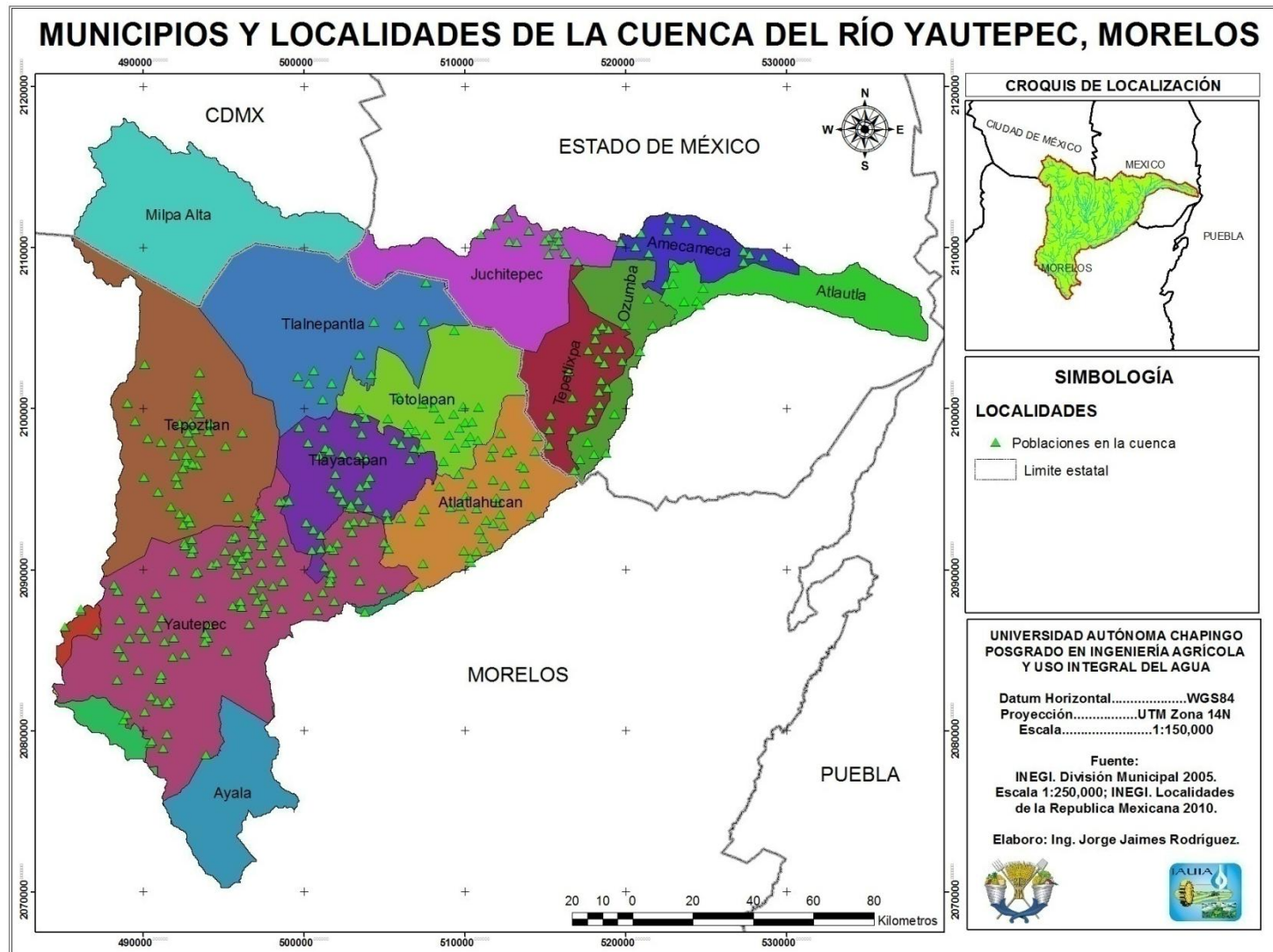


Figura 17. División municipal y localidades de la cuenca de estudio.

4.2. Materiales

4.2.1. Software

Se empleó el software SWAT, versión para ArcGIS 10.1 (ESRI, 2013), en la versión ArcSWAT 2012.10.17 y el programa SWAT-CUP 5.1.6.2, disponibles de manera gratuita en la página web del SWAT Texas A&M University (USDA-ARS, 2015).

4.2.2. Bases de datos

- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2006).
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2015a).
- Base de datos climática nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016) (<http://smn.conagua.gob.mx/climatologia/>) (Consulta: febrero de 2016).

4.2.3. Información topográfica

Se utilizó el modelo de elevación digital de INEGI con una resolución de 30 metros (INEGI, 2012).

4.2.4. Información de uso del suelo y vegetación

Se utilizaron las cartas de uso del suelo y vegetación serie I, escala 1:250,000, "E14-2" y "E14-5" (INEGI, 1984a; INEGI, 1984b) y serie IV escala 1:250,000 (INEGI, 2010a), de las cuales se extrajo mediante geoprocésamiento el uso del suelo y vegetación correspondiente al área de la cuenca para la serie de tiempo 1976 a 1985 y 2002 a 2011.

4.2.5. Información edafológica

Se utilizaron las cartas edafológicas escala 1:250,000, "E14-2" y "E14-5" (INEGI, 1983a; INEGI, 1983b) de las cuales se extrajo mediante geoprocésamiento los tipos de suelos correspondientes dentro de los límites de la cuenca de estudio.

4.2.6. Información hidrométrica

La cuenca del río Yautepec fue definida hasta la estación hidrométrica 18223 "Ticumán" (Figuras 18, 19 y 20). De la base de datos del BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) (CONAGUA, 2015a), se contó con información de escurrimientos en gastos mínimos ($Q_{\min}$), gastos máximos ($Q_{\max}$) y gastos medios (Q) expresados en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y el volumen mensual de escurrimientos (V_e) en miles de m^3 , para los años 1980 a 1985 y 2007 a 2009. Para la variable sedimentos se contó con información de los años 1980 a 1985 del volumen mensual de sedimento (V_s) en miles de m^3 (Cuadros 13 y 14).



Figura 18. Estación hidrométrica Ticumán.



Figura 19. Sistema de cable vía y canastilla de la estación hidrométrica.



Figura 20. Limnómetro de la estación hidrométrica.

Cuadro 13. Información de escurrimientos y sedimentos de la estación 18223 "Ticumán" de los años 1980 a 1985.

Año	Mes	$Q_{\max}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$Q_{\min}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	V_e (miles de m^3)	V_s (miles de m^3)
1980	Ene	1.646	0.017	0.105	283.340	0.000
1980	Feb	0.297	0.004	0.073	184.540	0.000
1980	Mar	0.430	0.007	0.020	53.940	0.000
1980	Abr	0.104	0.010	0.023	61.790	0.000
1980	May	97.000	0.015	0.629	1,686.430	10.490
1980	Jun	110.500	0.018	1.156	2,996.850	19.250
1980	Jul	46.600	0.032	0.826	2,213.080	13.360
1980	Ago	113.400	0.057	4.044	10,832.920	59.010
1980	Sep	33.900	0.269	2.611	6,768.140	9.090
1980	Oct	15.875	0.050	0.525	1,408.170	0.330
1980	Nov	2.175	0.020	0.144	375.450	0.000
1980	Dic	0.075	0.020	0.042	113.120	0.000
1981	Ene	0.113	0.021	0.049	133.050	0.000
1981	Feb	0.101	0.032	0.059	143.550	0.000
1981	Mar	0.059	0.004	0.028	76.010	0.000
1981	Abr	0.133	0.012	0.031	82.830	0.000
1981	May	0.920	0.024	0.050	136.560	0.000
1981	Jun	193.500	0.036	5.097	13,212.690	72.970
1981	Jul	146.200	0.597	7.437	19,921.700	78.530
1981	Ago	102.400	0.124	4.292	11,496.950	25.040
1981	Sep	21.160	0.080	2.364	6,128.280	2.670

Año	Mes	$Q_{\max}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$Q_{\min}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	V_e (miles de m^3)	V_s (miles de m^3)
1981	Oct	3.400	0.0400	0.310	832.580	0.000
1981	Nov	1.240	0.030	0.256	664.670	0.000
1981	Dic	0.245	0.028	0.064	172.960	0.000
1982	Ene	0.237	0.000	0.064	173.730	0.000
1982	Feb	0.295	0.000	0.062	151.570	0.000
1982	Mar	0.370	0.008	0.060	162.850	0.000
1982	Abr	0.515	0.021	0.061	158.550	0.000
1982	May	16.480	0.000	0.258	691.440	0.190
1982	Jun	20.800	0.015	0.412	1,070.260	0.760
1982	Jul	51.380	0.036	0.890	2,383.890	1.630
1982	Ago	0.790	0.024	0.060	161.470	0.000
1982	Sep	12.632	0.024	0.148	385.460	0.090
1982	Oct	4.950	0.021	0.187	500.940	0.000
1982	Nov	0.520	0.020	0.054	141.760	0.000
1982	Dic	0.300	0.022	0.053	143.590	0.000
1983	Ene	0.406	0.018	0.066	177.240	0.000
1983	Feb	0.338	0.018	0.054	132.010	0.000
1983	Mar	0.587	0.003	0.046	124.570	0.000
1983	Abr	0.190	0.013	0.045	117.790	0.000
1983	May	0.142	0.022	0.040	107.510	0.000
1983	Jun	75.600	0.028	0.672	1,742.550	12.750
1983	Jul	181.700	0.089	4.969	13,309.190	71.640
1983	Ago	16.000	0.057	1.333	3,571.040	2.910
1983	Sep	212.300	0.195	5.946	15,412.470	30.290
1983	Oct	1.664	0.048	0.277	742.600	0.000
1983	Nov	1.160	0.028	0.144	374.590	0.000
1983	Dic	0.112	0.010	0.034	91.210	0.000
1984	Ene	0.206	0.010	0.051	138.440	0.000
1984	Feb	0.206	0.014	0.044	112.570	0.000
1984	Mar	0.140	0.014	0.039	105.100	0.000
1984	Abr	0.068	0.014	0.027	70.240	0.000
1984	May	13.000	0.005	0.269	721.600	0.370
1984	Jun	40.605	0.016	1.385	3,590.680	12.480
1984	Jul	76.300	0.084	2.562	6,863.000	23.080
1984	Ago	58.020	0.107	1.812	4,855.550	4.180
1984	Sep	190.719	0.050	7.172	18,589.940	76.630
1984	Oct	90.849	0.076	1.040	2,788.070	6.790
1984	Nov	0.501	0.039	0.099	257.570	0.000
1984	Dic	0.133	0.021	0.051	137.330	0.000
1985	Ene	0.925	0.021	0.072	193.850	0.000
1985	Feb	0.776	0.010	0.074	179.620	0.000
1985	Mar	0.257	0.000	0.026	71.480	0.000
1985	Abr	0.294	0.006	0.030	78.310	0.000

Año	Mes	Q_{max} (m³·s⁻¹)	Q_{min} (m³·s⁻¹)	Q (m³·s⁻¹)	V_e (miles de m³)	V_s (miles de m³)
1985	May	10.500	0.006	0.087	235.010	0.110
1985	Jun	73.150	0.004	2.088	5,412.680	13.810
1985	Jul	50.250	0.080	2.045	5,479.380	11.770
1985	Ago	19.980	0.076	0.871	2,334.460	3.340
1985	Sep	117.731	0.068	1.404	3,641.710	6.310
1985	Oct	10.150	0.028	0.330	885.930	0.400
1985	Nov	0.602	0.015	0.072	188.110	0.000
1985	Dic	0.228	0.011	0.038	103.700	0.000

Cuadro 14. Información de escurrimientos y sedimentos de la estación 18223 "Ticumán" de los años 2006 a 2011.

Año	Mes	Q_{max} (m³·s⁻¹)	Q_{min} (m³·s⁻¹)	Q (m³·s⁻¹)	V_e (miles de m³)	V_s (miles de m³)
2006	Ene	0.000	0.000	0.000	0.000	N/D
2006	Feb	0.000	0.000	0.000	0.000	N/D
2006	Mar	0.160	0.000	0.010	28.000	N/D
2006	Abr	0.020	0.000	0.003	8.690	N/D
2006	May	6.992	0.001	0.212	567.630	N/D
2006	Jun	10.567	0.002	0.476	1,232.900	N/D
2006	Jul	129.373	0.002	2.166	5,802.620	N/D
2006	Ago	163.795	0.003	4.540	12,159.620	N/D
2006	Sep	281.003	0.101	7.454	19,319.780	N/D
2006	Oct	51.616	0.049	1.999	5,354.250	N/D
2006	Nov	0.179	0.01	0.066	171.480	N/D
2006	Dic	0.052	0.002	0.014	38.130	N/D
2007	Ene	0.024	0.002	0.006	14.861	N/D
2007	Feb	0.018	0.005	0.010	23.933	N/D
2007	Mar	0.007	0.004	0.005	14.083	N/D
2007	Abr	1.669	0.003	0.078	202.349	N/D
2007	May	1.298	0.001	0.017	46.483	N/D
2007	Jun	51.217	0.001	1.406	3,643.315	N/D
2007	Jul	83.303	0.002	2.967	7,945.517	N/D
2007	Ago	131.483	0.002	4.512	12,085.718	N/D
2007	Sep	168.047	0.002	7.510	19,464.797	N/D
2007	Oct	1.581	0.004	0.105	281.923	N/D
2007	Nov	1.442	0.003	0.161	417.917	N/D
2007	Dic	0.005	0.002	0.005	12.355	N/D
2008	Ene	0.006	0.003	0.005	12.614	N/D
2008	Feb	0.032	0.002	0.005	11.837	N/D
2008	Mar	1.975	0.002	0.089	238.378	N/D
2008	Abr	0.007	0.003	0.005	12.010	N/D
2008	May	0.037	0.006	0.008	21.254	N/D

2008	Jun	240.729	0.000	3.652	9,466.502	N/D
2008	Jul	149.563	0.000	5.030	13,471.142	N/D
2008	Ago	149.553	0.011	6.695	17,931.197	N/D
2008	Sep	238.168	0.116	9.690	25,116.912	N/D
2008	Oct	3.444	0.003	0.299	799.718	N/D
2008	Nov	0.602	0.030	0.072	187.488	N/D
2008	Dic	0.040	0.001	0.035	93.312	N/D
2009	Ene	0.013	0.000	0.000	0.173	N/D
2009	Feb	0.000	0.000	0.000	0.000	N/D
2009	Mar	0.152	0.000	0.001	3.629	N/D
2009	Abr	0.094	0.000	0.002	4.666	N/D
2009	May	0.000	0.000	0.000	0.518	N/D
2009	Jun	24.888	0.006	0.378	979.776	N/D
2009	Jul	36.182	0.002	1.089	2,917.814	N/D
2009	Ago	50.531	0.002	1.235	3,307.738	N/D
2009	Sep	127.108	0.048	5.790	15,007.594	N/D
2009	Oct	40.152	0.048	1.178	3154.464	N/D
2009	Nov	0.256	0.048	0.109	283.565	N/D
2009	Dic	0.060	0.036	0.049	132.106	N/D
2010	Ene	8.716	0.000	0.325	841.363	N/D
2010	Feb	77.360	0.009	5.775	15,466.896	N/D
2010	Mar	347.230	0.399	10.393	27,836.957	N/D
2010	Abr	240.777	0.291	11.170	28,953.158	N/D
2010	May	0.907	0.000	0.324	867.888	N/D
2010	Jun	0.863	0.000	0.121	313.978	N/D
2010	Jul	0.159	0.043	0.058	156.643	N/D
2010	Ago	0.069	0.042	0.052	140.227	N/D
2010	Sep	25.591	0.039	0.769	1,860.106	N/D
2010	Oct	0.078	0.007	0.032	85.104	N/D
2010	Nov	0.000	0.000	0.000	0.086	N/D
2010	Dic	N/D	N/D	0.000	0.000	N/D
2011	Ene	0.081	0.046	0.059	158.890	N/D
2011	Feb	0.078	0.038	0.056	135.475	N/D
2011	Mar	0.221	0.015	0.044	118.282	N/D
2011	Abr	0.233	0.010	0.039	100.310	N/D
2011	May	N/D	N/D	0.026	70.243	N/D
2011	Jun	169.078	0.001	1.903	4,932.922	N/D
2011	Jul	166.175	0.119	7.698	20,619.014	N/D
2011	Ago	225.964	0.041	8.394	22,482.403	N/D
2011	Sep	164.747	0.260	6.875	17,819.395	N/D
2011	Oct	42.774	0.228	1.894	5,073.322	N/D
2011	Nov	1.652	0.049	0.284	734.832	N/D
2011	Dic	0.210	0.045	0.075	200.880	N/D

N/D: Dato no disponible.

4.3. Métodos

En la Figura 21 se describe de manera general la metodología SWAT usada para la simulación de los escurrimientos y sedimentos en la cuenca de estudio, representada por el ingreso de las variables físicas y químicas de la cuenca y su posterior proceso de calibración, simulación y generación de resultados.

4.3.1. Recorrido de campo y muestreo de suelos

Para conocer las características de la cuenca y la obtención de los parámetros de suelo, se realizó un muestreo en ocho sitios de la cuenca como exhibe en la Figura 22, el criterio de selección de los sitios correspondió efectuar por cada una de las unidades edafológicas reportadas en la cartas edafológicas escala 1: 250,000, E14-5 y E14-2, (INEGI, 1983a; INEGI, 1983b). Los suelos representativos y sus características descritas por INEGI (2001b) se presentan a continuación:

- **Andosoles:** Suelos de origen volcánico, ligeros por su baja densidad aparente, y color claro a oscuro.
- **Cambisoles:** Suelos con subsuelo estructurado, donde las características de las rocas que los originan han desaparecido casi por completo, o suelos con capa superficial oscura mayor de 25 cm de espesor, con buen contenido de materia orgánica, pero pobre en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na).
- **Feozems:** Suelos con capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na).
- **Fluvisoles:** Suelos aluviales recientes, generados por influencia de los ríos.
- **Litosoles:** Suelos con menos de 10 cm de espesor.
- **Regosoles:** Suelos con características predominantes a la roca que les da origen.

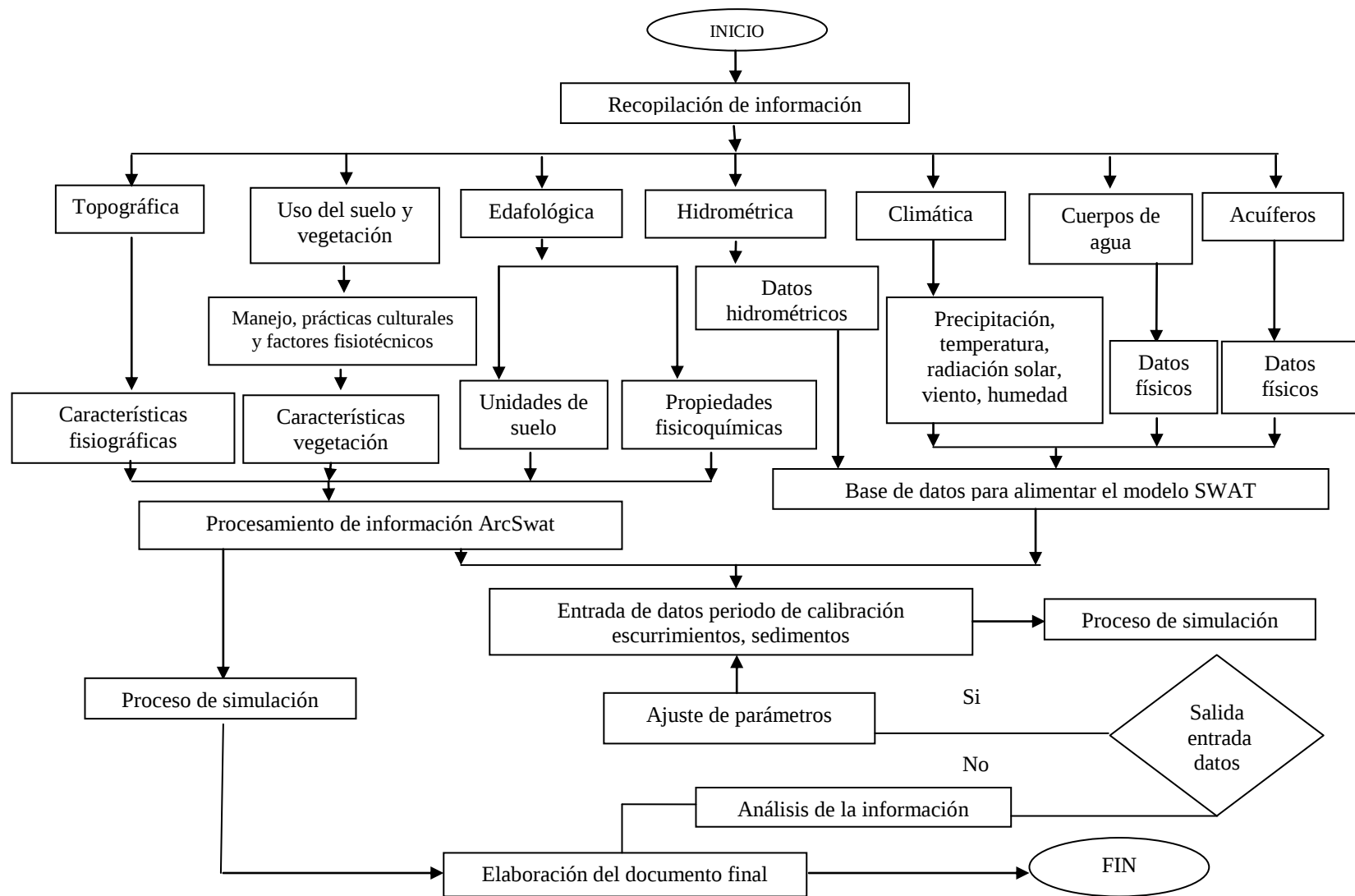


Figura 21. Diagrama de flujo metodológico (Neitsch *et al.*, 2011).



Figura 22. Ubicación de los sitios de muestreo de suelos.

- **Rendzinas:** Suelos con capa superficial hasta 50 cm de espesor que sobreyace a material altamente carbonatado, la capa es oscura con buen contenido de materia orgánica y rica en nutrientes y bases (Ca, Mg, K, Na).
- **Vertisoles:** Suelos arcillosos al menos dentro de 50 cm de profundidad, con microrelieve en forma de montículos, grietas de por lo menos 1 cm de ancho, y superficies pulidas por la fricción de los agregados.

En cada uno de los sitios de muestreo fue obtenida la conductividad eléctrica (μS) y el pH de cada una de las capas de suelo a través de Sensor Hanna Combo pH/EC/TDS HI-98129 (Figura 23).



Figura 23. Sensor de conductividad eléctrica y pH.

Asimismo, su reacción en campo al HCl y H_2O_2 que indicaría la presencia de contenidos importantes de carbonatos de calcio y materia orgánica.

4.3.1.1. Sitio 1: Suelo Fluvisol

Localización

En el Cuadro 15 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 15. Localización del sitio uno de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	522,775	2,107,753	2,413

Características generales

Terreno de cultivo de temporal en descanso con presencia alemana de amaranto y maíz de temporal con pendientes muy ligeras de orientación este, provenientes de lomeríos con influencia de arroyos; profundidad total del perfil de 84 cm, profundidad de raíces de 60 cm y siendo un perfil de suelo de tres capas (Cuadro 16 y Figuras 24 y 25).



Figura 24. Paisaje característico del sitio uno de muestreo de suelo.

Cuadro 16. Características en campo del perfil de suelo, del sitio uno de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	20	45	> 84
Espesor de la capa (cm)	20	25	> 39
Contenido de fragmento* de roca (%)	5 % fragmentos de 2 – 3 cm	10 % fragmentos de 2 – 3 cm	0 %, pequeños fragmentos
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR3/2	10YR6/3	10YR4/3
Conductividad eléctrica (ms)	0.02	0.01	0.01
Reacción al HCl*	No	No	No

Reacción H ₂ O ₂ *	Moderadamente fuerte - tardía	Moderadamente fuerte - tardía	Reacción menor
pH	5.96	6.0	6.04
Compactación *	Floja	Normal	Normal

*Criterios del personal en campo.



Figura 25. Perfil de suelo Fluvisol en la cuenca.

4.3.1.2. Sitio 2: Suelo Regosol

Localización

En el Cuadro 17 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 17. Localización del sitio dos de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	525,024	2,107,571	2,480

Características generales

Zona de cultivo de avena con relieve de bajada de pie de monte (ladera larga), lomerío suave entre arroyos con pendiente de orientación oeste, teniendo una profundidad total del perfil de 73 cm; profundidad de raíces de 45 cm, presentando el perfil tres capas (Cuadro 18 y Figuras 26 y 27).



Figura 26. Paisaje característico del sitio dos de muestreo de suelo.

Cuadro 18. Características en campo del perfil de suelo, del sitio dos de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	25	48	> 73
Espesor de la capa (cm)	25	23	> 25
Contenido de fragmento de roca (%) [*]	0 %	0 %	0 %
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR3/1	10YR3/2	10YR4/4
Conductividad eléctrica (ms)	0.0	0.0	0.0
Reacción al HCl [*]	No	No	No
Reacción H ₂ O ₂ [*]	Rápida y violenta	Fuerte y rápida	Moderada y rápida
pH	6.19	6.35	6.68
Compactación [*]	Normal	Normal	Densa

^{*}Criterios del personal en campo.



Figura 27. Perfil de suelo Regosol en la cuenca.

4.3.1.3. Sitio 3: Suelo Litosol

Localización

En el Cuadro 19 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 19. Localización del sitio tres de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	517,004	2,109,224	2,496

Características generales

Área de cultivo en bosque de encino con lomeríos moderadamente abruptos intercalados entre lomas con pendiente de orientación noroeste convexa moderada con lapsos de distancia cortos; profundidad total del perfil de 49 cm, profundidad de raíces de 35 cm, presentando el perfil dos capas (Cuadro 20 y Figuras 28 y 29).



Figura 28. Paisaje característico del sitio tres de muestreo de suelo.

Cuadro 20. Características en campo del perfil de suelo, del sitio tres de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	30	> 49
Espesor de la capa (cm)	30	> 19
Contenido de fragmento de roca (%)*	5 %, fragmentos de 1 cm	0 %, tepetate intemperizado
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR3/4	10YR5/4
Conductividad eléctrica (ms)	0.04	0.03
Reacción al HCl*	Muy ligera	No
Reacción H ₂ O ₂ *	Rápida y violenta	Muy ligera
pH	6.94	6.92
Compactación*	Normal	Dura



Figura 29. Perfil de suelo Litosol en la cuenca.

4.3.1.4. Sitio 4: Suelo Andosol

Localización

En el Cuadro 21 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 21. Localización del sitio cuatro de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	512,202	2,098,943	1,947

Características generales

Zona de agricultura de temporal con cercanía a parcelas de jitomate, pepino, agricultura protegida y huertas de aguacate, relieve de pie de monte, con presencia de material volcánico degradado (afloración de tepetate), con pendientes moderadas rectas con orientación al este; profundidad total del perfil 1.10 m, profundidad de raíces de 63 cm, presentando tres capas el perfil (Cuadro 22 y Figuras 30 y 31).

Cuadro 22. Características en campo del perfil de suelo, del sitio cuatro de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	30	54	> 110
Espesor de la capa (cm)	30	24	> 56

Contenido de fragmento * de roca (%)	1 % menores a 1 cm	1 %, menores a 1 cm	5 % fragmentos intemperizados
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR4/6	10YR5/6	10YR6/6
Conductividad eléctrica (ms)	0.0	0.03	0.83
Reacción al HCl*	No	No	No
Reacción H ₂ O ₂ *	Rápida y violenta	Fuerte	Fuerte
pH	7.3	6.68	6.47
Compactación *	Normal	Densa	Dura

*Criterios del personal en campo.



Figura 30. Paisaje característico del sitio cuatro de muestreo de suelo.



Figura 31. Perfil de suelo Andosol en la cuenca.

4.3.1.5. Sitio 5: Suelo Cambisol

Localización

En el Cuadro 23 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 23. Localización del sitio cinco de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	509,039	2,094,060	1,614

Características generales

Zona de agricultura de temporal en descanso con cultivos cercanos de flores y sorgo, ladera con pendiente suave de orientación sureste con afloramiento de roca volcánica y presencia de pedregosidad, presencia de vidrio volcánico en capas subyacentes silicatadas; profundidad total del perfil de 58 cm, profundidad de raíces de 20 cm, presentando tres capas el perfil de suelo (Cuadro 24 y Figuras 32 y 33).

Cuadro 24. Características en campo del perfil de suelo, del sitio cinco de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	20	38	58
Espesor de la capa (cm)	20	18	> 20
Contenido de fragmento de roca (%) [*]	1 %	10 %	20 %
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR2/1	7.5YR3/2	10YR3/1
Conductividad eléctrica (ms)	0.01	0.01	0.01
Reacción al HCl [*]	No	No	No
Reacción H ₂ O ₂ [*]	Rápida y violenta	Rápida y severa	Rápida y moderada
pH	6.5	6.48	6.85
Compactación [*]	Densa	Dura	Severa

^{*}Criterios del personal en campo.



Figura 32. Paisaje característico del sitio cinco de muestreo de suelos.



Figura 33. Perfil de suelo Cambisol.

4.3.1.6. Sitio 6: Suelo Vertisol

Localización

En el Cuadro 25 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 25. Localización del sexto sitio de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	499,753	2,088,829	1,292

Características generales

Palmar en hilera, con presencia de pasto amacollado y cultivos cercanos de caña de azúcar, zona de valle plano con pendiente muy ligera a nula; profundidad total del perfil de 40 cm, con profundidad de raíces de 40 cm, siendo el perfil de suelo de dos capas (Cuadro 26 y Figuras 34 y 35).



Figura 34. Paisaje característico del sitio seis de muestreo de suelo.

Cuadro 26. Características en campo del perfil de suelo, del sitio seis de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	30	> 40
Espesor de la capa (cm)	30	> 10
Contenido de fragmento de roca (%) [*]	10 %	Roca – basalto intemperizado
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR2/1	10YR4/4
Conductividad eléctrica (ms)	0.01	0.01
Reacción al HCL [*]	No	No

Reacción H ₂ O ₂ *	Muy ligera	Muy ligera
pH	7.08	6.89
Compactación*	Dura	Severa

*Criterios del personal en campo.



Figura 35. Perfil de suelo Vertisol.

4.3.1.7. Sitio 7: Suelo Feozem

Localización

En el Cuadro 27 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 27. Localización del séptimo sitio de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	491,611	2,086,966	1,292

Características generales

Lomerío con pendiente moderada de orientación sureste con afloramiento de roca ígnea; capas de suelo con gran presencia de roca, vegetación secundaria de selva baja caducifolia, profundidad total del perfil de 45 cm, profundidad de raíces de 40 cm, perfil de suelo con dos capas (Cuadro 28 y Figuras 36 y 37).

Cuadro 28. Características en campo del perfil de suelo, del sitio siete de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	26	> 45
Espesor de la capa (cm)	26	> 19
Contenido de fragmento de roca (%) [*]	40 %	5 %
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR2/1	10YR2/1
Conductividad eléctrica (ms)	0.02	0.01
Reacción al HCl [*]	No	No
Reacción H ₂ O ₂ [*]	Rápida y violenta	Rápida y moderada
pH	7.06	7.21
Compactación [*]	Dura	Severa

^{*}Criterios del personal en campo.



Figura 36. Paisaje característico del sitio siete de muestreo de suelo.



Figura 37. Perfil de suelo Feozem en la cuenca.

4.3.1.8. Sitio 8: Suelo Rendzina

Localización

En el cuadro 29 se presenta se muestran los datos relevantes de la ubicación del sitio.

Cuadro 29. Localización del octavo sitio de muestreo.

Zona UTM	X	Y	Altitud (m)
14 Q	487,502	2,085,384	1,292

Características generales

Sierra con pendiente abrupta de orientación sur, con vegetación de selva baja caducifolia; profundidad total del perfil de 25 cm, profundidad de raíces de 25 cm, presentando dos capas el perfil de suelo (Cuadro 30 y Figuras 38 y 39).

Cuadro 30. Características en campo del perfil de suelo, del sitio ocho de muestreo.

Parámetro	Capa 1	Capa 2
Profundidad de la capa (desde la superficie del suelo a la parte inferior de la capa) (cm)	3	> 25
Espesor de la capa (cm)	3	> 22
Contenido de fragmento de roca (%)	100 %	100 %
Color del suelo (Tabla Munsell)	10YR5/4	10YR7/4
Conductividad eléctrica (ms)	0.01	0.02
Reacción al HCl	Fuerte	Fuerte
Reacción H ₂ O ₂	Rápida y violenta	Moderada
pH	8.46	8.5
Compactación	Floja	Floja

*Criterios del personal en campo.



Figura 38. Paisaje característico del sitio ocho de muestreo de suelo.



Figura 39. Perfil de suelo Rendzina en la cuenca.

4.3.2. Parámetros topográficos

4.3.2.1. Configuración de la cuenca

Se delimitó la cuenca de estudio con el programa SWAT, predefiniendo un número de 41 subcuencas basadas en un área de umbral de drenaje de 1570 ha. Igualmente se preestableció una red de drenaje con un área umbral de 100 ha.

4.3.2.2. Pendiente

Se utilizaron tres rangos de pendiente: menor de 10 %, de 10 % a 30 % y mayor de 30%, basados en la jerarquía de geoformas principales propuesta por Vargas *et al.*, (2009) (Cuadro 31). En la Figura 40 se muestra el comportamiento de la pendiente (%).

Cuadro 31. Rangos de pendiente utilizados en la modelación hidrológica.

1 ^{er} nivel	Gradiente (%)
Tierras a nivel	< 10
Tierras con pendiente	10 - 30
Tierras escarpadas	> 30

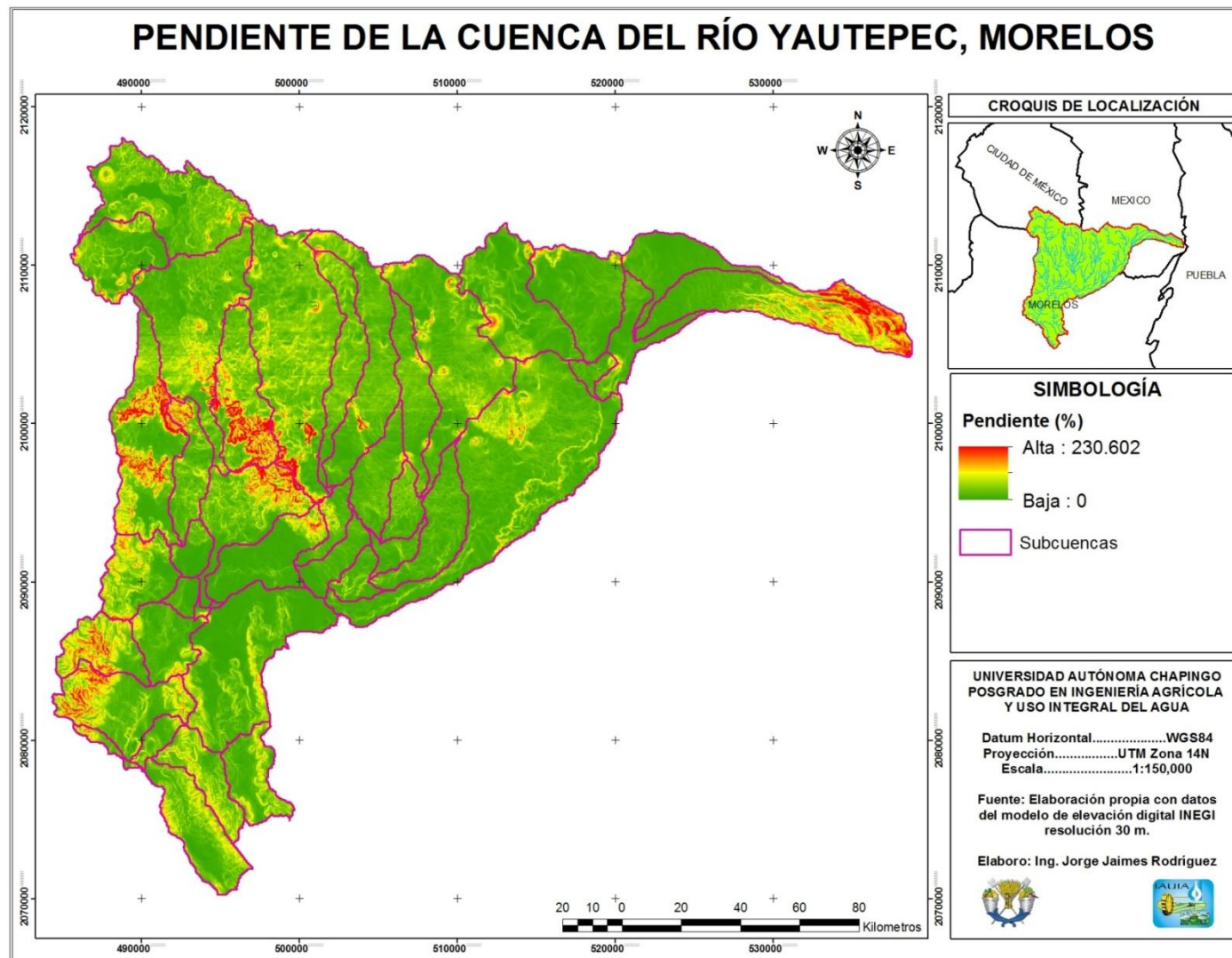


Figura 40. Pendiente de la cuenca de estudio.

4.3.2.3. Unidades de respuesta hidrológica (HRU)

La subdivisión de la cuenca en zonas que poseen un único uso del suelo, suelo y pendiente (HRU's) permite que el modelo refleje las diferencias en evaporación y otras condiciones hidrológicas para diferentes usos del suelo / cultivos y suelos. El escurrimiento es predicho separadamente para cada HRU y se encamina a obtener el escurrimiento total de la cuenca. Esto aumenta las predicciones y proporciona una mejor descripción física del balance hídrico. Se indicaron los criterios de formación de las HRU's con los datos de uso del suelo, pendiente y suelos en la cuenca, proponiéndose de la siguiente manera: (Uso del suelo 20 %; Suelo 10 %; Pendiente 20 %).

Estos parámetros que cubren un porcentaje del área de la subcuenca menor que el nivel umbral son eliminados. Después del proceso de eliminación, el área de los parámetros restantes se reasigna de manera que el 100 % del área en la subcuenca sea modelada (Cuadro 32, 33 y 34).

Cuadro 32. Reajuste del uso del suelo y vegetación en la cuenca de estudio con el criterio HRU.

Uso del suelo y vegetación	% cuenca 1976 - 1985	% cuenca 2002 - 2011
Agricultura de riego	10.45	7.74
Agricultura de temporal	47.74	52.00
Bosque de encino	2.15	-----
Bosque de encino-pino, pino-encino	-----	0.85
Bosque de abies, mesófilo de montaña	5.51	5.03
Bosque de pino	15.87	13.44
Pastizal inducido	1.77	1.00
Pradera de alta montaña	-----	-----
Selva baja caducifolia	16.37	17.25
Área sin vegetación	-----	-----
Urbano	0.13	2.69

Cuadro 33. Reajuste de los tipos de suelo en la cuenca de estudio con el criterio HRU.

Suelos	% cuenca 1976 - 1985	% cuenca 2002 - 2011
Andosol	26.15	26.25
Litosol	18.58	17.44
Fluvisol	2.61	2.50
Regosol	12.64	12.22
Feozem	6.92	5.43
Cambisol	6.28	5.98
Vertisol	14.77	16.04
Rendzina	12.05	14.14

Cuadro 34. Reajuste de la pendiente en la cuenca de estudio con el criterio HRU.

1^{er} nivel	Gradiente (%)	% cuenca 1976 - 1985	% cuenca 2002 - 2011
Tierras a nivel	< 10	54.54	53.86
Tierras con pendiente	10 - 30	35.18	36.13
Tierras escarpadas	> 30	10.28	10.01

4.3.3. Parámetros de uso del suelo y vegetación

Se clasificaron los diversos usos del suelo de las serie I y IV de INEGI de acuerdo con los grupos florísticos disponibles en SWAT (Neitsch *et al.*, 2011) (Cuadro 35).

Cuadro 35. Clasificación del uso del suelo y vegetación SWAT.

Uso del suelo y vegetación	Clave SWAT
Agricultura de riego	AGRL
Agricultura de temporal	AGRRT
Bosque de encino	OAK
Bosque de encino-pino, pino-encino	FRST
Bosque de abies, mesófilo de montaña	FRSE
Bosque de pino	PINE
Pastizal inducido	RNGE
Pradera de alta montaña	WPAS
Selva baja caducifolia	FRSD
Área sin vegetación	BARR
Urbano	URLM

4.3.4. Parámetros edafológicos

4.3.4.1. Preparación de muestras de suelo

Recopiladas muestras de suelo de cada una de las capas de los diversos perfiles de suelo, fueron secadas al sol como se muestra en la Figura 41, siendo el primer paso en el proceso de los análisis de laboratorio.

4.3.4.2. Análisis de laboratorio

Finalizado el proceso de secado al sol de cada una de las muestras, una parte de las mismas fue trasladada a las instalaciones del Laboratorio Central Universitario, de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en el cual se realizaron los análisis físicos pertinentes dentro de la modelación SWAT (Anexo 1, 2, 3 y 4), siendo los más importantes los siguientes:



Figura 41. Proceso de secado al sol de las muestras de suelo.

- **Textura:** obtenida con el método del hidrómetro de Bouyoucus (Bouyoucus, 1962) y clasificada de acuerdo al triángulo de texturas del USDA.
- **Contenido de materia orgánica (%):** a través del método de Walkley y Black modificado por Walkley (1947).

- **Carbonato total (CaCO_3):** se obtuvo con el método de Horton-Newson (Horton *et al.*, 1953).

Asimismo se determinaron las siguientes características de laboratorio en las instalaciones del Laboratorio de Agua y Suelo del Departamento de Irrigación de la UACH:

- **Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP):** se obtuvo mediante la olla de presión con 0.30 atm para CC y 15 atm para PMP, expresadas en contenido de humedad gravimétrico y volumétrico.
- **Color del suelo húmedo:** se obtuvo a través de la tabla Munsell de identificación del color de suelo (Munsell Color, 1990) (Figura 42).



Figura 42. Determinación del color de suelo húmedo.

- **Roca (% total del peso):** se obtuvo mediante la separación de 100 g de suelo extraído aleatoriamente de cada una de las muestras; posteriormente con un proceso de cernido con agua, para la depuración de las rocas utilizando un tamiz de 2 mm, se separaron aquellas partículas con un diámetro superior, calculando el porcentaje respecto al total de la muestra (Figuras 43, 44, 45, 46 y 47).



Figura 43. Extracción de 100 g de muestra de suelo.



Figura 44. Pesado de 100 g de muestra de suelo.



Figura 45. Proceso de bateo y separación de partículas.



Figura 46. Partículas mayores a 2 mm de diámetro.

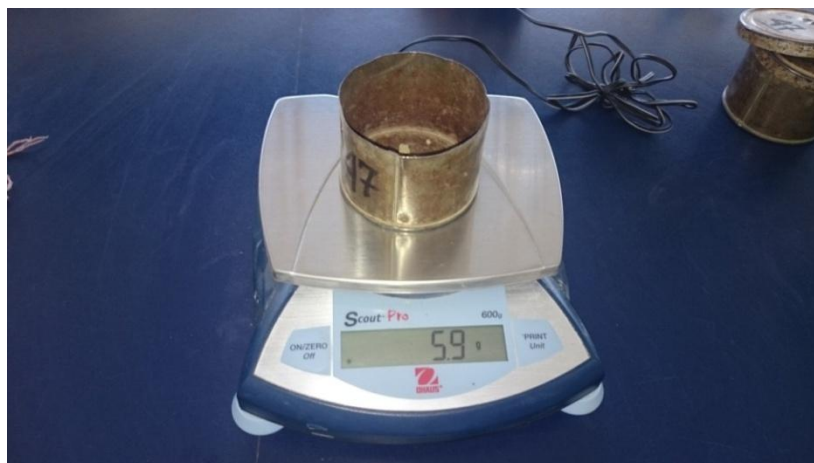


Figura 47. Pesado de las partículas mayores a 2 mm de diámetro.

4.3.4.3. Factor de erodabilidad K

Neitsch *et al.*, (2011) mencionan que algunos suelos se erosionan más fácilmente que otros, aun cuando todos los factores son los mismos. Esta diferencia es llamada erodabilidad del suelo y es causada por las propiedades del mismo. Wischmeier y Smith (1978) definen el factor de erodabilidad del suelo como el promedio de pérdida del suelo por índice de erosión unitario, para un suelo específico medido en un cuadro unitario.

Este factor se definió usando la ecuación de Williams (1995) en la expresión 33.

$$K_{usle} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (33)$$

Donde f_{csand} es un factor que da valores bajos de erorabilidad para suelos con alto contenido de arena gruesa y valores altos para tierras con poca arena (ecuación 34); f_{cl-si} es un factor dando que genera valores bajos de erorabilidad para suelos con alto porcentaje en arcilla y limo expresado en la ecuación 35; f_{orgc} es un factor que reduce erorabilidad para suelos con alto contenido de carbono orgánico expresado en la ecuación 36; f_{hisand} es un factor que reduce la erorabilidad del suelos para suelos con muy alto contenido de arena expresado en la ecuación 37, siendo el cálculo de los factores:

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (34)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (35)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 * orgC}{orgc + \exp[3.72 - 2.95 * orgC]} \right) \quad (36)$$

$$f_{hisad} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (37)$$

Donde m_s es el porcentaje de contenido de arena (0.05-2.00 mm de diámetro de partículas); m_{silt} es el porcentaje de contenido de limo (0.002-0.05 mm de diámetro de partículas); m_{sand} es el porcentaje de contenido de arcilla (<0.002 mm de diámetro de partículas) y $orgC$ es el porcentaje de carbono orgánico.

4.3.4.4. Albedo del suelo

Según Romo y Arteaga (1989) citado por Muñoz (1997) el albedo es un término que expresa la reflectividad de un cuerpo, con respecto a la radiación solar.

El cálculo del albedo del suelo se efectuó utilizando la ecuación 38, propuesta por Post *et al.*, (2000).

$$Albedo\ del\ suelo = 0.069 \cdot (color\ valúe) - 0.114 \quad (38)$$

4.3.4.5. Grupo hidrológico del perfil

Fue determinado a partir de la metodología del Servicio de Conservación del Suelo (SCS, 1972) para cada uno de los suelos presentes en la cuenca, en la cual fueron clasificados a partir de sus propiedades hidráulicas y texturales obtenidas en laboratorio.

4.3.4.6. Capacidad del agua disponible

La capacidad de agua disponible o humedad aprovechable en el suelo, se refiere a la capacidad de un suelo para retener agua que puede ser extraída por las raíces de la plantas. Se ingresaron los valores de SOL_AWC convirtiendo las unidades de contenido gravimétrico a volumétrico para cada capa de cada uno de los suelos y finalmente utilizando la expresión 39:

$$SOL_AWC = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot Pr \quad (39)$$

Donde SOL_AWC es la humedad aprovechable ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$); θ_{cc} es el contenido de agua a capacidad de campo ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$); θ_{pmp} es el contenido de agua al punto de marchitez permanente ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$) y Pr es la profundidad de la capa (mm).

4.3.4.7. Conductividad hidráulica y densidad aparente

Estos parámetros fueron obtenidos a través del programa calculador de propiedades hidráulicas "Soil Water Characteristics" generado por el USDA teniendo su sustento teórico en el trabajo de Saxton *et al.*, (2006).

En dicho programa fueron ingresados los datos de textura, materia orgánica y % roca en peso obtenidos de los análisis de laboratorio, partiendo de una compactación normal para la cálculo de la conductividad hidráulica en ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) y densidad aparente en ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

4.3.5. Parámetros climáticos

4.3.5.1. Estaciones meteorológicas y datos faltantes

Para determinar la estación meteorológica de cada subcuenca, el modelo utiliza un método de cálculo para encontrar la menor distancia existente entre cada estación meteorológica y el centroide de cada subcuenca. Se utilizaron ocho estaciones ubicadas dentro de la cuenca y en un radio promedio de 5 km con características climáticas similares (Cuadro 36).

Cuadro 36. Estaciones meteorológicas con datos útiles en la cuenca.

Coordenadas geográficas (°)			Coordenadas UTM		Elevación (m)
Estación	Latitud	Longitud	X	Y	
15039	19.09	-98.88	512,126.66	2,110,451.70	2,543
15103	19.08	-98.74	527,526.68	2,110,099.43	2,620
17001	18.93	-98.90	510,529.20	2,093,417.06	1,631
17005	18.81	-98.95	505,180.62	2,079,836.04	1,302
17012	18.91	-98.97	503,130.01	2,090,469.90	1,380
17018	18.76	-99.12	487,234.83	2,074,184.46	970
17024	18.87	-99.08	491,257.34	2,086,113.45	1,231
17039	19.04	-99.09	490,120.52	2,105,163.81	2,836

De dichas estaciones se ingresó en formato de texto la precipitación diaria y temperaturas máximas y mínimas diarias, del periodo 1976 a 1985 y 2002 a 2011, años que presentaron una serie más completa. Se completó la base de datos de la serie histórica donde existían datos faltantes, generados por el método del U.S National Weather Service o del inverso del cuadrado de la distancia (Campos, 1998; McCuen, 2005).

4.3.5.2. Estaciones meteorológicas convencionales

Se ejecutó el cálculo de escurrimientos con el método de número de curva para los periodos 1976 a 1985 y 2002 a 2011, ingresando la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas de manera diaria de las estaciones antes mencionadas (Figura 48).

4.3.5.3. Estaciones meteorológicas automáticas

Para la estimación de los escurrimientos con el método de Green & Ampt el método necesita información subhoraria de precipitación, para lo cual se utilizó información disponible de precipitación proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional a través de la estaciones meteorológicas automáticas que aparecen en el Cuadro 37 y Figura 49.

Cuadro 37. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas para el periodo 2008 a 2011.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	X	Y	Elevación (m)
EMA Tepoztlán	18.9508	-99.0788	491,694.52	2,095,389.14	1,384
EMA Ecoguardas	19.2713	-99.2038	478,575.70	2,130,869.07	2,200
EMA Parque Izta-Popo	19.0955	-98.6430	537,547.06	2,111,438.78	3,682
EMA IMTA	18.8822	-99.1569	483,470.01	2,087,803.01	1,355

4.3.5.4. Probabilidades climáticas

Posteriormente se calcularon las estadísticas climáticas de las variables que aparecen en el Cuadro 38, usando los años con registros climáticos de 1976 a 1988 y 2002 a 2011, que ingresaron como datos de entrada para los periodos de simulacion (Anexos 5 y 6), usando el programa "WGNmaker4.xlsm" que utiliza la misma metodología implementada en el programa WXPARM desarrollado por Williams (1992).

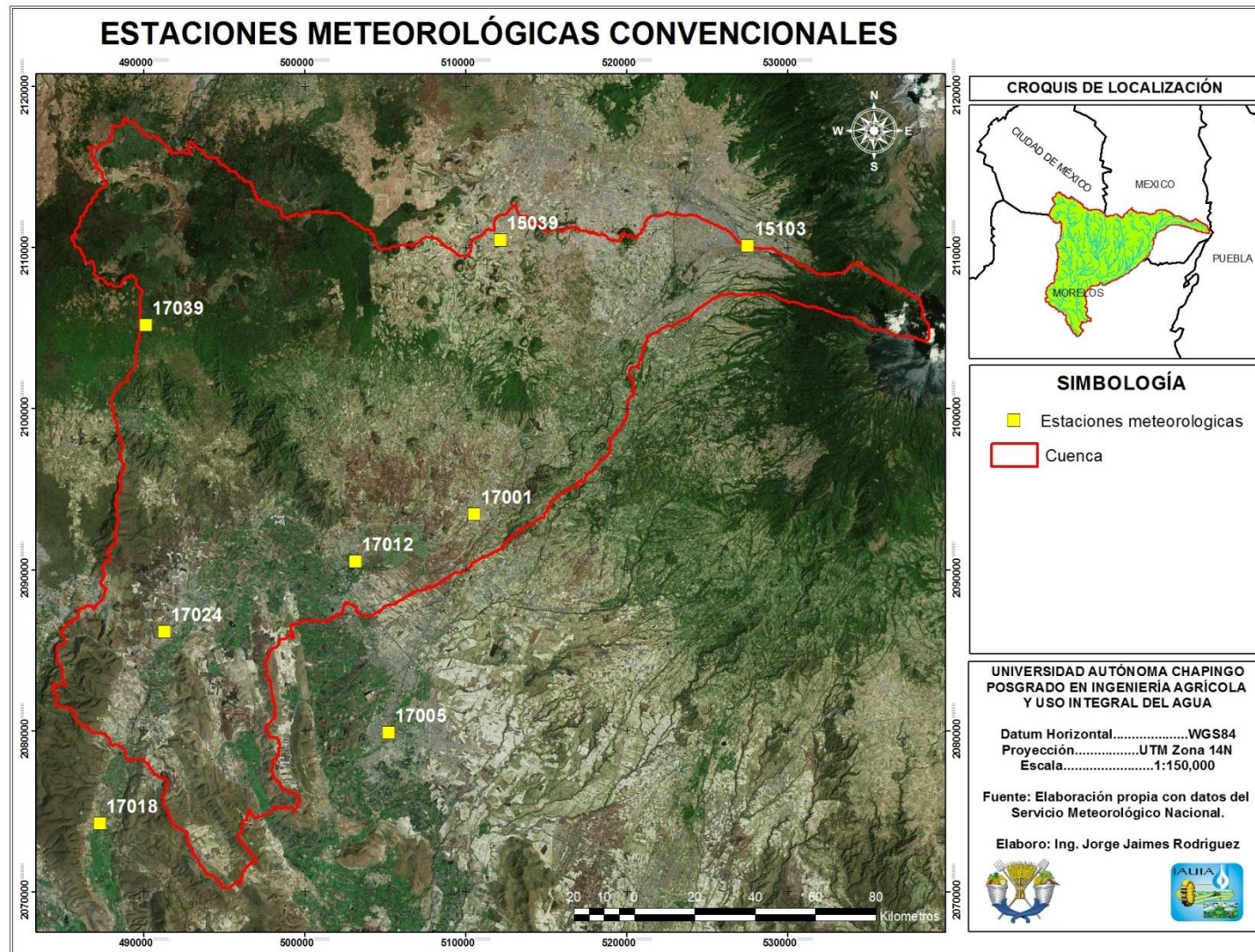


Figura 48. Estaciones meteorológicas convencionales utilizadas

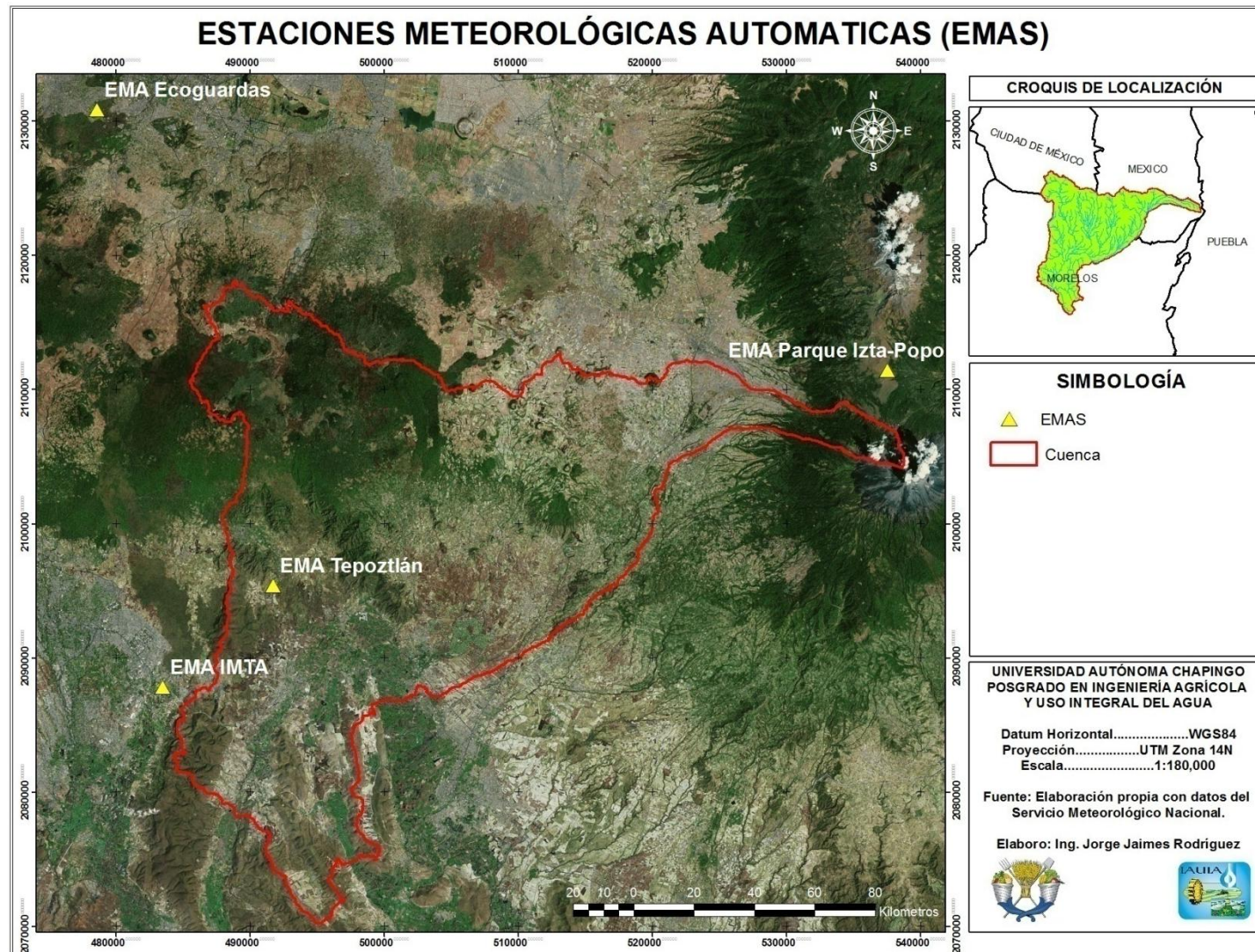


Figura 49. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas.

Este programa es de dominio público y fue descargado del sitio <http://swat.tamu.edu/software/>. Se trata de una macro de Excel diseñada exclusivamente para calcular las estadísticas climáticas de acuerdo a la metodología del manual teórico del SWAT definidas por Neitsch *et al.*, (2011).

Cuadro 38. Estadísticas climáticas para la base de datos del modelo SWAT.

Variable	Descripción
TMPMX	Temperatura máxima promedio del aire para el mes (°C)
TMPMN	Temperatura mínima promedio del aire para el mes (°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes (°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes (°C)
PCPMM	Precipitación media mensual (mm)
PCPSTD	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes (mm)
PCPSKW	Coeficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes
PR_W1	Probabilidad de un día húmedo después de un día seco en el mes (fracción)
PR_W2	Probabilidad de un día húmedo después de un día de lluvia en el mes (fracción)
PCPD	Número promedio de días con precipitación en el mes
SOLARAV	Radiación solar promedio diaria en el mes $\text{MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$
DEWPT	Temperatura promedio del punto de rocío en el mes (°C)
WINDAV	Velocidad media del viento en el mes ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.3.5.5. Intensidad mensual de la lluvia en 30 minutos

SWAT requiere como dato de entrada la intensidad de la lluvia máxima mensual en 30 minutos (I_{30}) a obtenerse de preferencia a partir de un pluviógrafo o de una estación meteorológica automática.

Se aplicó la ecuación de lluvia intensa generalizada propuesta por Chen (1983), para obtener el I_{30} a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones meteorológicas 17005, 17039 y 15103 como representativas de la cuenca del río Yautepec obteniendo el I_{30} de 10 años de periodo de retorno, ya que dicho periodo es el

recomendado para diseñar las obras y prácticas de conservación de suelo y agua en México (SAGARPA, 2011).

Se obtuvieron los máximos mensuales de cada año y se ajustaron a una distribución de probabilidad con el menor error estándar que permitiera estimar la precipitación máxima mensual en 24 h para periodos de retorno de 2, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Las precipitaciones mensuales obtenidas se multiplicaron por 1.13 debido a la corrección por intervalo fijo de observación (Hershfield, 1961).

Para cada mes, se estimó el cociente lluvia-duración R (ecuación 40) que resulta de dividir la lluvia de una hora de duración P_1^2 entre la lluvia de 24 horas P_{24}^2 , ambas con un periodo de retorno T de dos años (Ibáñez y Ledesma, 2005).

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad (40)$$

Donde R es el cociente de lluvia - duración; P_1^2 es la lluvia de una hora de duración y dos años de periodo de retorno; P_{24}^2 es la lluvia de 24 horas de duración y dos años de periodo de retorno.

El U.S Weather Bureau propone un criterio para determinar el valor de P_1^2 , que consiste en la utilización de una gráfica (Figura 50), la cual consiste en obtener la lluvia media anual de las máximas diarias (mm) y relacionarla con el número medio anual de días con tormenta o precipitación apreciable (mayor a 1 mm), dichos datos se pueden obtener de los registros de estaciones climatológicas.

Para la obtención de las magnitudes de lluvia (mm) para una duración de 30 minutos y 10 años de periodo de retorno se aplicaron las ecuaciones de Chen (1983); en este sentido, propone una fórmula general expresada en la ecuación 38 para representar la relación intensidad - duración - frecuencia para los Estados Unidos, siendo necesario

para la utilización de este método la lluvia de 10 años de periodo de retorno y 1 hora de duración, que se calcula con la ecuación 41.

$$P_1^{10} = R * P_{24}^{10} \quad (41)$$

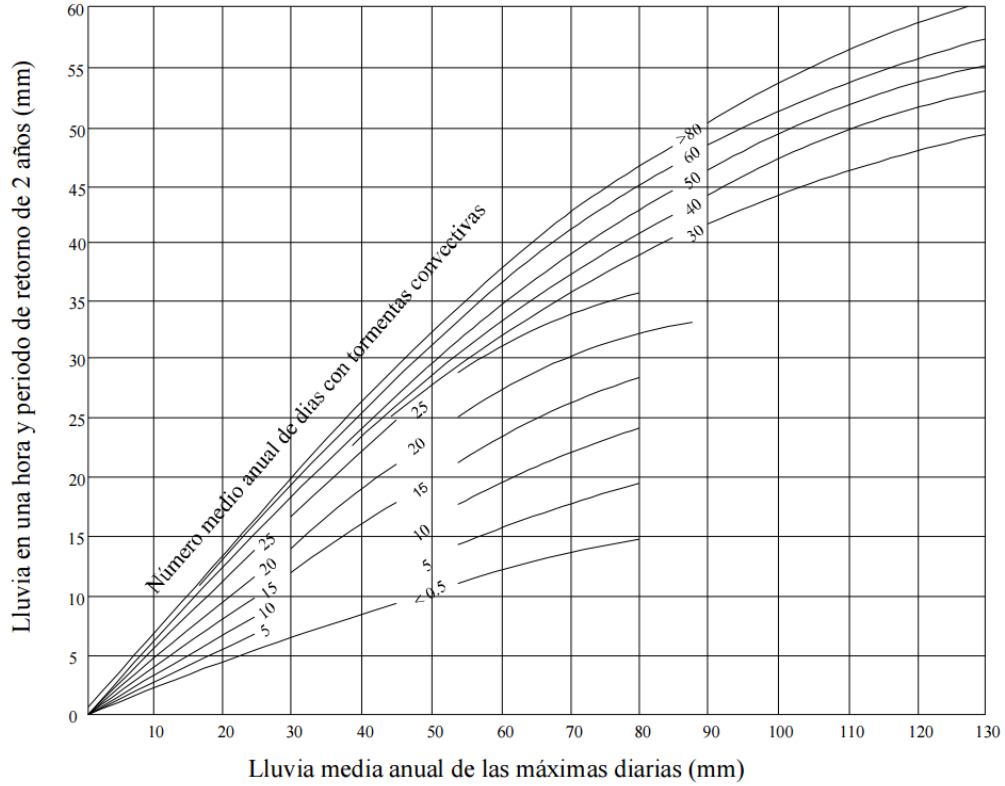


Figura 50. Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de dos años (Reich, 1963).

Partiendo de los datos anteriores se determinaron los valores de los parámetros a, b y c para la ecuación de Chen (1983). Finalmente con los valores calculados anteriormente se sustituyeron en la ecuación 42 para el periodo de retorno de 10 años y 30 minutos de duración.

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-X} T^{X-1}) * t}{60 * (t + b)^c} \quad (42)$$

Donde P_t^T es la magnitud de la lluvia correspondiente a un periodo de retorno de T años y una lluvia de t minutos de duración en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, P_1^{10} es la lluvia de una hora de duración y periodo de retorno de 10 años en mm, t es la duración de la lluvia en minutos, T es el periodo de retorno en años, P_{24}^{100} es la lluvia de 24 horas de duración y cien años de periodo de retorno, P_{24}^{10} , es la lluvia de 24 horas de duración y 10 años de periodo de retorno, X es la relación de frecuencias P_{24}^{100}/P_{24}^{10} ; a, b, c son parámetros que fueron determinados a partir de las ecuaciones 43, 44 y 45.

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \quad (43)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \quad (44)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \quad (45)$$

La ecuación es válida para $T > 1$ año y para $5 \leq d \leq 24$ horas

Se calculó los valores de I_{30} (Cuadros 39 y 40) para tres estaciones meteorológicas representativas de las condiciones ambientales de la cuenca (17005, 17039 y 151103), siendo los valores de estas replicados para las estaciones meteorológicas que se presentan a continuación:

- Estación 17005: 17001, 17005, 17012, 17018, 17024
- Estación 17039: 17039
- Estación 15103: 15039, 15103

Cuadro 39. Intensidad de la precipitación en 30 minutos (I_{30}) para estaciones representativas de la cuenca del periodo 1976 a 1988 en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
15103	6.53	2.40	4.24	5.25	6.72	9.91	24.36	12.41	9.81	3.89	2.42	1.34
17005	2.74	1.53	1.91	0.80	5.53	15.00	11.96	12.72	11.85	3.98	4.75	1.65
17039	6.45	1.68	3.72	4.65	14.06	24.38	17.29	28.09	14.31	9.28	4.30	1.54

Cuadro 40. Intensidad de la precipitación en 30 minutos (I_{30}) para estaciones representativas de la cuenca del periodo 2002 a 2011 en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
15103	3.48	3.50	2.24	2.60	5.15	10.52	8.77	12.13	8.56	6.94	2.10	2.61
17005	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17039	5.15	18.48	2.14	3.07	5.33	32.76	19.30	18.11	14.70	22.59	6.81	0.10

4.3.5.6. Promedio mensual de la radiación solar

El promedio mensual de la radiación solar en el mes se calculó por medio de tablas de radiación solar mensual ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) por latitud con referencia a la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas convencionales, desarrolladas por Allen *et al.*, (1998) y su posterior conversión a $\text{MJ}\cdot\text{m}^2\cdot\text{dia}^{-1}$ (Anexos 5 y 6).

4.3.5.7. Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío

El promedio mensual de la temperatura del punto de rocío de cada mes (Anexos 5 y 6) fue calculada a partir de la humedad relativa (%) obtenida por el método de interpolación IDW (Philip y Watson, 1982; Watson y Philip, 1985) con base en los datos de los observatorios sinópticos de Cuernavaca, Tacubaya, Tlaxcala, Puebla, Toluca, y la ecuación 46 propuesta por Linsley (1967).

$$TR = T - \{(14.55 + 0.114T)*X + [(2.5 + 0.007T)X]^3 + (15.9 + 0.117T)*X^{14}\} \quad (46)$$

Donde TR es la temperatura del punto de rocío en $^{\circ}\text{C}$; T es la temperatura del aire en $^{\circ}\text{C}$; HR es la humedad relativa en porcentaje y $X = 1 - (HR/100)$.

4.3.5.8. Promedio mensual de la velocidad del viento

El promedio mensual de la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) para cada una de las estaciones convencionales (Anexo 5 y 6) fue calculado por el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) (Philip y Watson, 1982; Watson y Philip, 1985) con base en los datos de los observatorios sinópticos arriba mencionados.

4.3.5.9. Determinación de la evapotranspiración

Debido a la escasez de datos climáticos de las estaciones meteorológicas en la cuenca tales como: radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Se optó por seleccionar el método de Hargreaves (Hargreaves, 1975). Varias mejoras fueron hechas a la ecuación original (Hargreaves y Samani, 1982 y 1985) y la forma utilizada en el SWAT fue publicada por los autores Hargreaves *et al.*, (1985) expresada en la ecuación 47.

$$\lambda E_0 = 0.0023 * H_0 * (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} * (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (47)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$); E_0 es la evaporación potencial ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$); H_0 es la radiación extraterrestre ($\text{MJ}\cdot\text{m}^2\cdot\text{dia}^{-1}$); T_{mx} es la máxima temperatura del aire para un día dado ($^{\circ}\text{C}$); T_{mn} es la temperatura mínima del aire para un día dado ($^{\circ}\text{C}$); y $\overline{T_{av}}$ es la temperatura media del aire para un día dado ($^{\circ}\text{C}$).

4.3.6. Cuerpos de agua

Dentro de la cuenca de estudio se encuentran los cuerpos de agua listados en el Cuadro 41, los cuales no fueron incluidos dentro de la modelación hidrológica debido a su escasa información y tamaño, según la clasificación presentada en el Cuadro 42.

Cuadro 41. Presas de almacenamiento presente en la cuenca de estudio.

ID	Nombre oficial	Almacenamiento (hm^3)	Altura de la cortina(m)
2456	Bordo El Jagüey	0.24	8.0
2513	Yautepec	0.23	4.0

Cuadro 42. Clasificación de presas de almacenamiento.

Categoría	Características de la presa		Avenida (años)
	Almacenamiento en Mm ³	Altura en metros	
Pequeña	< 1.5	< 15	TR = 500 años
			TR = 1000 años
			TR = 10,000 años
Mediana	entre 1.5 y 60	> 12 y < 30	TR = 1000 años a 10,000
			TR = 10,000 años
			TR > 10,000 años
Mayor	> 60	> 18	TR = 10,000 años

Fuente: Campos (2007).

4.3.7. Acuíferos

Se encuentran dentro de los límites de la cuenca de estudio cuatro acuíferos: Cuautla-Yautepec (1702), Chalco-Amecameca (1506), Ciudad de México (0901) y Cuernavaca (1701), representando el primero más del 85 % del área como se aprecia en el Cuadro 43 y la Figura 51, centrándose esta investigación en las características del acuífero Cuautla-Yautepec.

Cuadro 43. Acuíferos presentes en la cuenca de estudio.

Acuífero	Área (%)
Cuautla - Yautepec (1702)	86.17
Chalco - Amecameca (1506)	2.05
Ciudad de México (0901)	10.09
Cuernavaca (1701)	1.69

CONAGUA (2015b) reporta que en el área del acuífero Cuautla - Yautepec (que cubre alrededor del 85 % de la cuenca de estudio y representa de manera general las unidades hidroestratigráficas en la misma), se desarrollaron planicies a consecuencia de que productos volcanoclásticos del Terciario y Cuaternario, al depositarse sobre una topografía muy accidentada, originaron los valles de Cuautla, Yautepec y Ticumán.

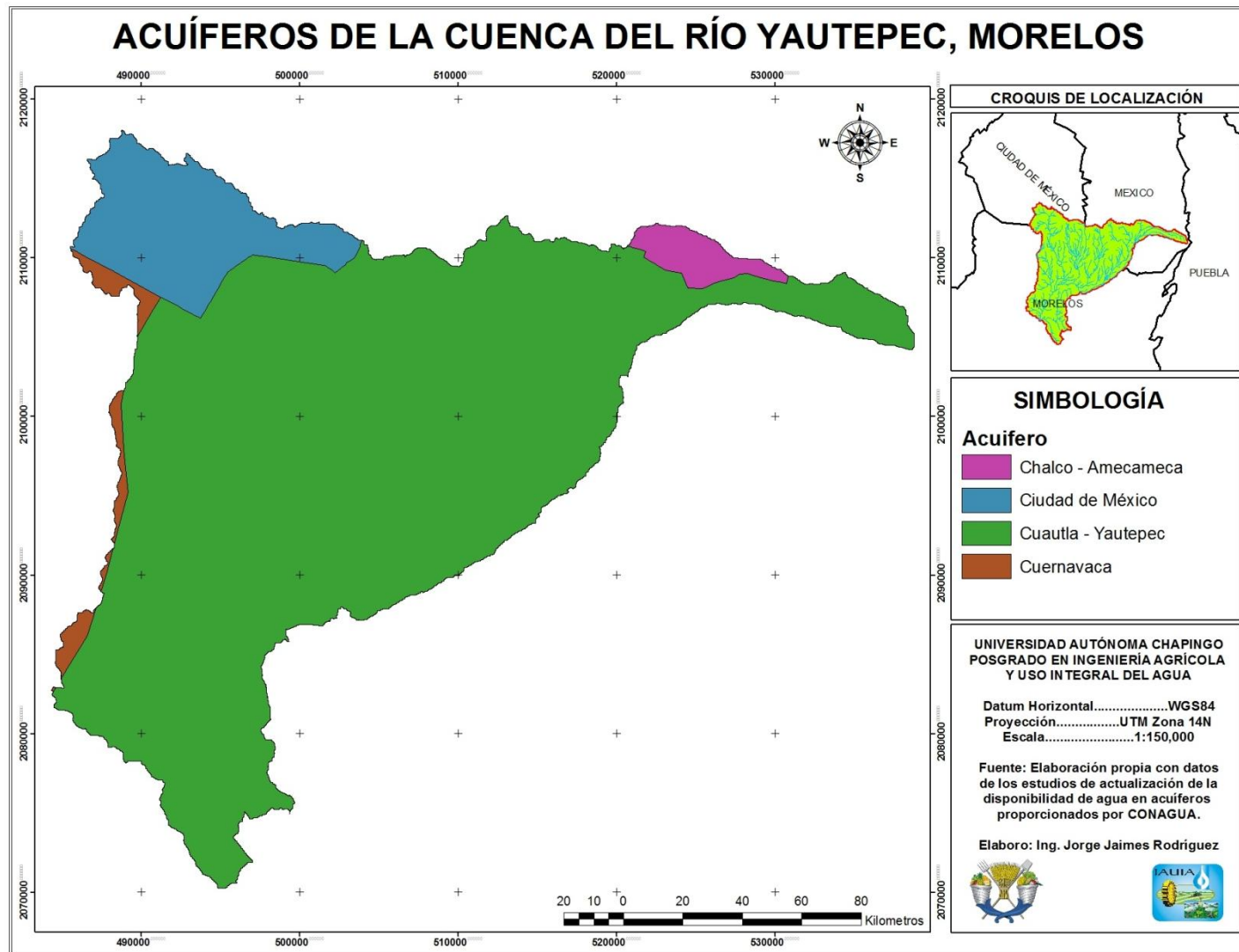


Figura 51. Acuíferos presentes en la cuenca de estudio.

Se identificaron tres unidades hidroestratigráficas en el acuífero Cuautla - Yautepec:

- La primera, con porosidad intergranular, formada por depósitos clásticos continentales de origen volcánico de tipo conglomerático constituidos por fragmentos de basaltos y andesitas débilmente empacados en arena y arcilla y por rellenos aluviales; todos estos materiales granulares rellenan los valles estructurales con espesores variables entre 60 y 150 metros.

Dentro de esta unidad hidroestratigráfica se puede considerar a los derrames lávicos o coladas de basalto que dan origen a los manantiales del valle, cuyas descargas naturales no interfieren en el funcionamiento y/o comportamiento del acuífero libre constituido por los depósitos clásticos continentales: areniscas, conglomerados y aluviones.

- La segunda unidad hidrogeológica, definida como un acuífardo, se asocia con los materiales del Grupo Balsas y la Formación Mexcala; son materiales que tienen la capacidad de almacenar agua pero que no fácilmente la ceden y funcionan como basamento del acuífero libre del valle Cuautla-Yautepec y estrato semiconfinante entre el acuífero libre y la tercera unidad.
- La tercera unidad hidrogeológica se encuentra debajo del Grupo Balsas y la Formación Mexcala. Constituye un acuífero regional y profundo, es del tipo “semiconfinado” y se aloja en materiales calizos de las Formaciones Morelos y Cuautla, siendo el basamento de la secuencia hidroestratigráfica. El agua subterránea en este acuífero circula a través de fallas geológicas, fracturas o conductos de disolución y se manifiesta a través de manantiales.

La información anterior se usó como punto de partida para trabajar las variables SHALLST y DEEPST, que representan la profundidad umbral del acuífero superficial o profundo, en estas variables se ingresaron los valores reportados de los niveles estáticos dentro de la cuenca, y estimaciones a partir de características geológicas (Figura 52).

De acuerdo con CONAGUA (2015b) la configuración del nivel estático no demuestra alteraciones de flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Para poder tener una aproximación del factor GW_DELAY que se define como el tiempo de retardo del agua subterránea en días, desde que sale del perfil de suelo y entra al acuífero, se estimó a partir de la conductividad hidráulica de las formaciones geológicas y la profundidad reportada o estimada de los acuíferos superficial y profundo a través de los niveles estáticos.

Los valores de conductividad hidráulica para la zona media-baja de la cuenca, zona representada por acumulaciones de material aluvial y rocas sedimentarias fueron tomados a partir de información de tres pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación, que reportaron valores entre $1.17 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $1.93 \times 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($101 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$ a $16.7 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$), típicos de permeabilidad de gravas y arenas finas a gruesas (CONAGUA, 2015b); considerando para esta investigación los valores medios.

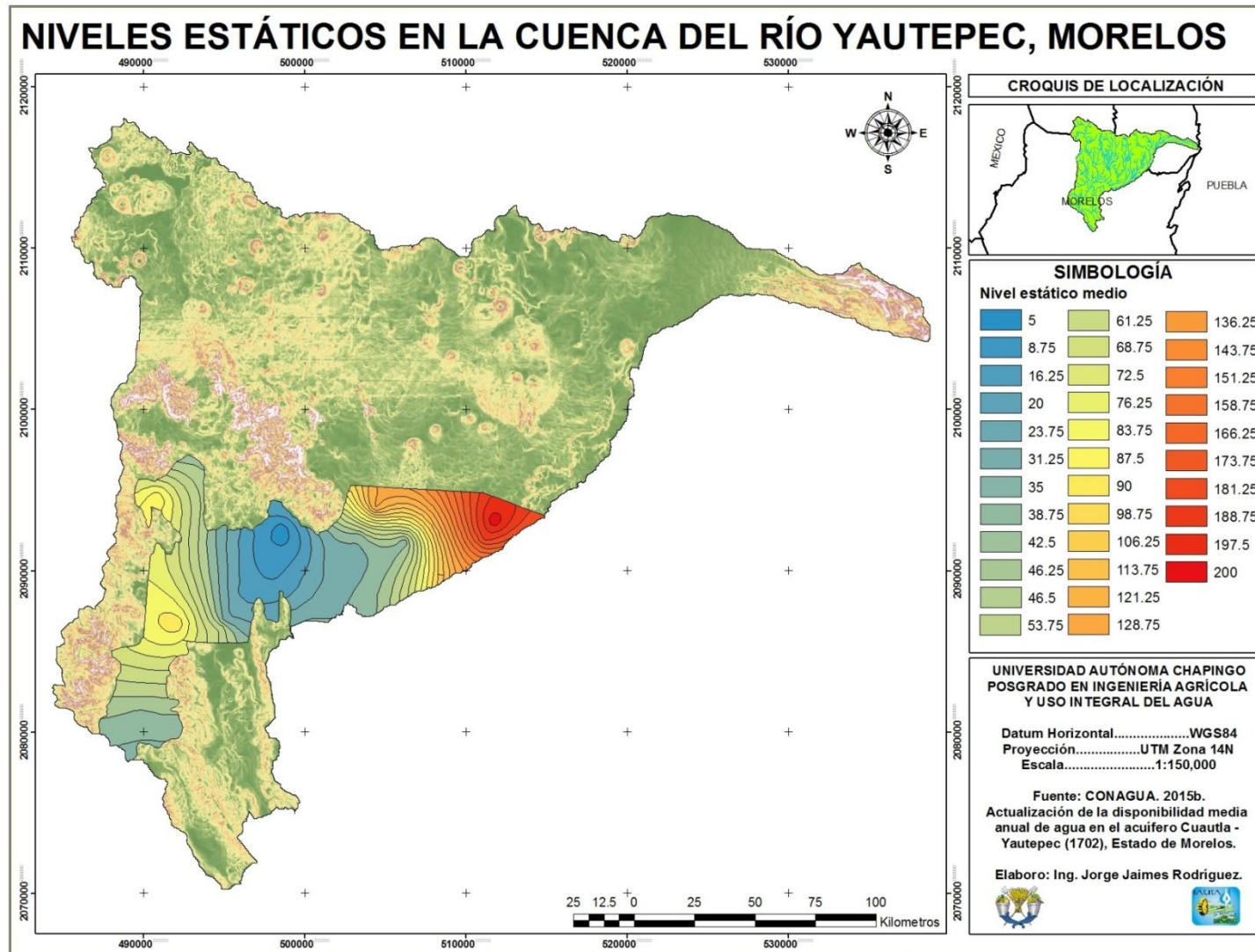


Figura 52. Niveles estáticos medios reportados en la cuenca de estudio.

Para la zona montañosa donde no se contó con datos de conductividad hidráulica, área representada por rocas ígneas y metamórficas fracturadas, se tomó el criterio de Smith y Weathcraft (1993), los cuales, reportan valores de 10^{-5} a $1 \text{ m} \cdot \text{día}^{-1}$, considerando al igual que en el párrafo anterior, los valores medios.

El parámetro ALPHA_BF se definió con base a los tipos de suelo presentes en la cuenca, asignando valores con respecto a sus características de conductividad hidráulica, estos valores se muestran en el Cuadro 44.

Cuadro 44. Valores ingresados para el parámetro ALPHA_BF.

Suelo	Valor ALPHA_BF
Andosol	0.5
Cambisol	0.2
Feozem	0.2
Fluvisol	0.9
Litosol	0.5
Regosol	0.9
Rendzina	0.5
Vertisol	0.2

En el Cuadro 45 se presenta un resumen de los parámetros hidrológicos e hidráulicos ingresados al SWAT correspondientes al parámetro del agua subterránea, cabe mencionar que para las variables GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, RCHRG_DP, RCHRG_DP y GW_SPYLD, se tomaron los valores por default, mismos que se explican a mayor detalle en el manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

Cuadro 45. Parámetros hidrológicos requeridos en la variable de agua subterránea.

Parámetro	Descripción	Valor mínimo cuenca	Valor máximo cuenca
SHALLST	Profundidad inicial de agua en el acuífero superficial (m)	0	225
DEEPST	Profundidad umbral de agua en el acuífero profundo (m)	0	220
GW_DELAY	Tiempo de retardo de aguas subterráneas (días)	0.25	442

ALPHA_BF	Factor de caudal base alfa (días)	0.2	0.9
GWQMN*	Profundidad umbral del agua en el acuífero superficial requerida para que se produzca el flujo de retorno (mm)	3000	
GW_REVAP*	Coeficiente de movimiento del acuífero superficial a la zona saturada	0.02	
REVAPMN*	Profundidad umbral del agua en el acuífero superficial para que la percolación al acuífero profundo ocurra (mm)	1000	
RCHRG_DP*	Fracción de percolación del acuífero profundo	0.05	
GWHT*	Altura inicial de las aguas subterráneas (m)	0	
GW_SPYLD*	Rendimiento específico del acuífero ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0	
ALPHA_BF_D	Factor alpha para la curva de recesión del acuífero profundo (días)	0.01	

*Valores asignados por default por el programa SWAT.

4.3.8. Uso del agua

4.3.8.1. Sector público - urbano

CONAGUA (2010) indica que de acuerdo al Programa Hídrico Visión 2030 (PHV) del Estado de Morelos, para el año 2005 la cuenca del río Yautepec, definida hasta su conexión con el río Amacuzac contaba con una población de 263,660 hab., con un volumen de extracción para este uso de 44.1 hm^3 para el año 2010. Con lo anterior, se aplicó una relación lineal entre el tamaño de población de la cuenca del censo de población 2010 y el de 1980 (Cuadro 46).

Cuadro 46. Volumen de extracción de agua para uso público - urbano.

Parámetro	Censo 1980	Censo 2010
Población estimada (hab)	122,119	250,101
Vol. Extracción (hm^3)	20.426	41.832

4.3.8.2. Sector agrícola

La zona de agricultura de riego de la cuenca de estudio forma parte del distrito de riego 016 "Estado de Morelos", estando presentes en diferentes proporciones las unidades de riego: Bajo Yautepec, Alto Yautepec y Cuautla.

Rodríguez (2015) indica que dentro de la cuenca del río Yautepec, hasta su conexión con el río Amacuzac se encuentran distribuidas 17,734 ha de riego del distrito 016, en las cuales se distribuyen 156.39 hm³ de agua. Con dicha información se realizó una tendencia lineal para estimar el agua necesaria en la superficie de agricultura de riego presentes en las series I y IV de uso del suelo y vegetación de INEGI cuyos resultados se muestran en el Cuadro 47.

Cuadro 47. Volumen de extracción de agua para uso agrícola.

Parámetro	Serie I INEGI	Serie IV INEGI
Superficie agrícola (ha)	8514.830	7723.200
Vol. Extracción (hm ³)	75.089	68.108

Rodríguez (2015) menciona que el uso agrícola representa el 85% del volumen de extracción de agua en la cuenca, mientras que el uso industrial y otros representan el 2%, este último valor basándose en uso del agua del año 2010. La CNA (1992) reporta que muestra que el 98.65 % del uso agrícola se obtiene vía subterránea y solo 1.35 % proveniente de fuentes superficiales en la cuenca.

Rodríguez (2015) indica que la relación de extracción del uso público - urbano pertenece 80 % a extracción vía subterránea, mientras que el uso industrial y otros se abastece al 100 % de esta manera (Cuadro 48).

Cuadro 48. Resumen de la extracción de agua.

Parámetro	Censo 1980			Censo 2010		
	Superficial (hm³)	Subterráneo (hm³)	Total	Superficial (hm³)	Subterráneo (hm³)	Total
Uso						
Público - Urbano	4.085	16.341	20.426	8.366	33.466	41.832
Agrícola	1.014	74.075	75.089	0.919	67.189	68.108
Industrial y Otros	0.000	1.603	1.603	0.000	1.603	1.603
Total	5.099	92.019	97.118	9.285	102.258	111.543

El PHV 2030 indica que del agua superficial utilizada en la cuenca del río Yautepec hasta la conexión del río Amacuzac el 88.89 % proviene de manantiales, por lo que dentro del ingreso de la variable del uso del agua al programa SWAT se añadió esta cantidad al uso subterráneo, ya que representa las salidas de un sistema acuífero, ilustrado en el Cuadro 49.

Cuadro 49. Resumen de la extracción de agua subterránea en la cuenca de estudio reajustando la extracción de manantiales.

Parámetro	Censo 1980			Censo 2010		
	Superficial (hm³)	Subterráneo (hm³)	Total	Superficial (hm³)	Subterráneo (hm³)	Total
Uso Público - Urbano	0.453	19.973	20.426	0.929	40.903	41.832
Agrícola	0.113	74.976	75.089	0.102	68.006	68.108
Industrial y Otros	0.000	1.603	1.603	0.000	1.603	1.603
Total	0.566	96.552	97.118	1.031	110.512	111.543

La cantidad total de agua de agua utilizada en la cuenca fue dividida 85% en el periodo seco y 15% en el periodo húmedo, con base en el cálculo del periodo de crecimiento (FAO, 1978; FAO, 1981) y los datos de las normales climatológicas de la zona de influencia de riego (Cuadros 50, 51, 52 y 53 y Figura 53).

Cuadro 50. Datos de precipitación en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
17001	7.1	2.0	2.2	4.9	38.2	185.7	160.7	158.1	161.4	53.8	15.5	4.7
17003	11.0	1.8	4.1	11.5	45.9	181.9	170.9	156.1	149.6	65.9	20.1	4.3
17005	10.0	2.4	3.9	9.9	54.0	191.8	165.7	155.9	159.3	67.9	17.6	4.1
17012	11.6	2.7	4.4	14.0	54.4	199.4	168.7	200.8	184.8	78.3	15.3	5.9
17013	9.4	2.4	3.8	9.2	55.8	206.0	184.7	175.5	154.7	61.5	8.7	5.5
17018	10.7	2.8	3.4	9.6	63.3	208.9	190.0	183.8	172.2	64.7	13.5	5.5

17024	11.5	2.7	3.7	10.6	57.8	186.7	170.3	174.7	192.4	77.0	13.4	5.1
17043	12.3	4.2	3.3	13.3	71.1	210.3	198.9	219.5	196.2	79.2	20.5	6.0
17052	7.6	1.8	1.5	14.1	77.0	206.5	188.5	228.1	172.4	68.6	14.7	2.8
Promedio	10.1	2.5	3.4	10.8	57.5	197.5	177.6	183.6	171.4	68.5	15.5	4.9

Cuadro 51. Datos de evaporación en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
17001	116.5	107.8	144.7	161.7	167.5	151.9	127.7	130.0	125.9	124.8	119.5	113.9
17003	128.1	149.3	201.1	208.4	199.5	161.5	156.8	153.0	132.5	136.8	121.2	117.6
17005	128.1	149.3	201.1	208.4	199.5	161.5	156.8	153.0	132.5	136.8	121.2	117.6
17012	129.0	143.4	191.2	195.0	187.0	147.0	139.3	137.5	119.5	119.8	117.8	115.8
17013	119.3	134.7	199.6	226.2	205.7	186.5	174.5	162.4	139.7	132.0	109.8	110.4
17018	92.9	119.5	169.5	182.0	172.5	142.5	141.4	134.4	111.7	106.0	90.3	82.2
17024	113.6	136.3	203.9	223.3	211.5	178.5	171.3	165.5	137.4	126.2	105.4	101.0
17043	133.5	156.6	209.8	221.3	206.4	152.5	143.8	143.5	120.6	133.5	124.2	119.1
17052	163.1	172.8	212.3	213.3	196.6	156.5	146.5	144.0	128.2	136.4	147.2	156.1
Promedio	124.9	141.1	192.6	204.4	194.0	159.8	150.9	147.0	127.6	128.0	117.4	114.9

Mediante el uso de la fórmula del tanque tipo A, en el cual la evaporación registrada en la estación es multiplicada por 0.8, se obtuvo los valores de ETP (Cuadro 52) a partir de los promedios mensuales del Cuadro 51, posteriormente fue multiplicada por 0.5 y se obtuvo el valor 0.5 ETP (Cuadro 53).

Cuadro 52. ETP promedio en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	99.9	112.9	154.1	163.5	155.2	127.9	120.7	117.6	102.0	102.4	93.9	91.9

Cuadro 53. 0.5 ETP promedio en mm de las estaciones meteorológicas en el área de influencia de la zona de riego de los años 1970 a 2000.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	50.0	56.4	77.0	81.8	77.6	63.9	60.4	58.8	51.0	51.2	47.0	45.9

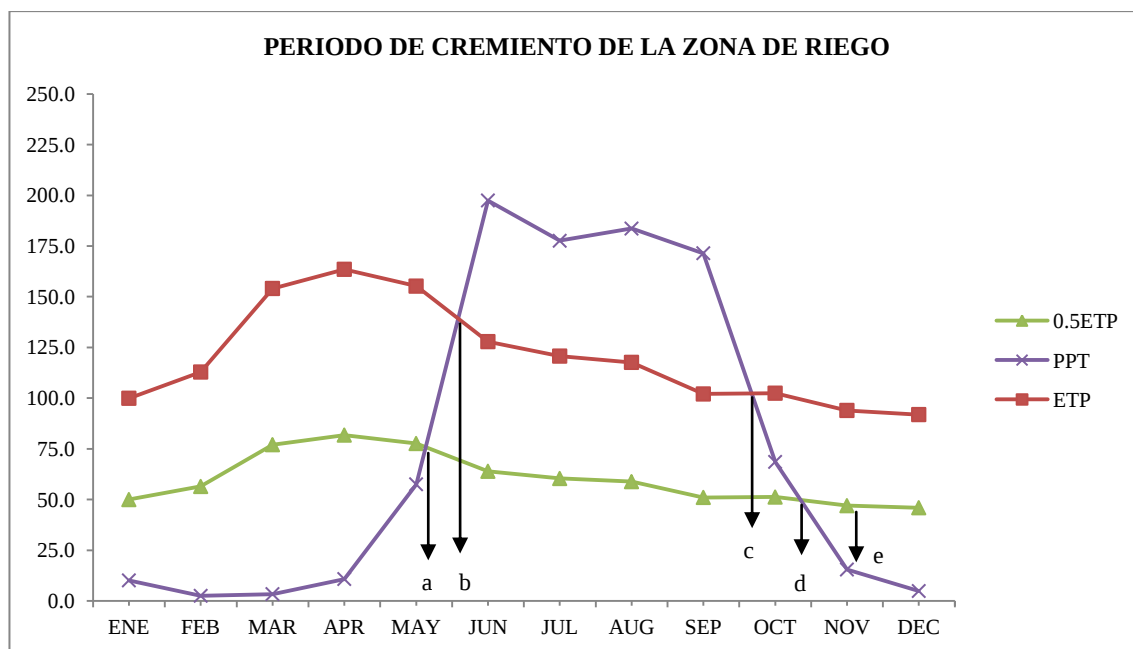


Figura 53. Periodo de crecimiento propuesto de la zona de riego presente en la cuenca de estudio.

Del análisis del periodo de crecimiento se estableció las fechas de inicio y fin del periodo húmedo como referencia para la extracción de agua de uso agrícola en la cuenca.

- a: Inicio de la temporada de lluvias y periodo de crecimiento (5 junio).
- b: Inicio del periodo húmedo (19 de junio).
- c: Fin del periodo húmedo (22 de octubre).
- d: Fin de la temporada de lluvias (10 de noviembre).
- e: Fin del periodo de crecimiento (6 de diciembre).

El Diario Oficial de la Federación (DOF, 2015) propone porcentajes recomendados de retorno con relación a diferentes usos: Uso agrícola: 20 %, Público-Urbano: 75 % e Industrial: 55 %.

Por consiguiente se aplicó este parámetro en la consideración final para cuantificar el volumen de extracción a ingresar al SWAT, arrojando las distribuciones de agua en los

dos periodos simulados, mismas que se presentan en los Cuadros 54 y 55 para los periodos 1976 a 1985 y 2002 a 2011.

Cuadro 54. Extracción diaria promedio durante el periodo 1976 a 1985.

Extracción	Uso del agua promedio diario mensual ($10^4 \cdot m^3$)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
WURCH ¹	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.055	0.042	0.042	0.042	0.048	0.063	0.063
WUSHAL ²	22.809	22.809	22.809	22.809	22.809	17.659	8.763	8.763	8.763	12.841	22.809	22.809

¹Extracción proveniente del sistema fluvial; ²Extracción proveniente del acuífero libre.

Cuadro 55. Extracción diaria promedio durante el periodo 2002 a 2011.

Extracción	Uso del agua promedio diario mensual ($10^4 \cdot m^3$)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
WURCH ¹	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.086	0.073	0.073	0.073	0.079	0.093	0.093
WUSHAL ²	22.268	22.268	22.268	22.268	22.268	17.596	9.528	9.528	9.528	13.226	22.268	22.268

¹Extracción proveniente del sistema fluvial; ²Extracción proveniente del acuífero libre.

4.3.9. Transporte de agua y sedimentos

Con el fin de simular los procesos físicos que afectan el flujo de agua y el transporte de sedimentos en la red de canales en la cuenca, SWAT requiere de información sobre las características físicas del cauce principal dentro de cada subcuenca (Neitsch *et al.*, 2011) (Cuadro 56).

SWAT ofrece dos vertientes para el cálculo del transporte de sedimentos, los cuales se explican a detalle en el manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

- Determinado por la erosión del cauce: Ecuación simplificada de Bagnold (Default) (Williams, 1980).
- Determinados por el tamaño de partículas: Modelo simplificado de Bagnold (Arnold *et al.*, 1995); Modelo Kodoatie (Kodoatie, 2000); Modelo de Molinas y Wu (Molinas y Wu, 2001) y el Modelo de Yang de arena y grava (Yang, 1996).

Debido a la escasa disponibilidad de datos relacionados a las características físicas de las partículas del cauce, se decidió partir del método default que ofrece SWAT descrito por Williams (1980).

Cuadro 56. Parámetros hidrológicos requeridos en la variable de transporte de agua y sedimentos en la cuenca.

Parámetro	Descripción	Valor
CH_W(2)	Anchura media del canal principal en la parte superior del banco (m)	Calculado por SWAT
CH_D	Profundidad del canal principal (m)	Calculado por SWAT
CH_S(2)	Pendiente media del canal principal ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	Calculado por SWAT
CH_L(2)	Longitud del canal principal (km)	Calculado por SWAT
CH_N(2)	Coeficiente de Manning "n" para el canal principal	0.04
CH_K(2)	Conductividad hidráulica efectiva del aluvión en el canal principal	30
CH_COV1	Factor de erodabilidad del canal	5.4
CH_COV2	Factor de cobertura del canal	5.4
CH_WDR	Relación anchura - profundidad del canal	Calculado por SWAT
ALPHA_BNK	Factor de flujo base alfa para almacenamiento de banco	0 [†]
ICANAL	Código para canal de irrigación	0
CH_SIDE	Cambio en distancia horizontal por unidad de distancia vertical	1
CH_BNK_BD*	Densidad aparente para el sedimento del banco del canal ($\text{g}\cdot\text{cc}^{-1}$)	1.4
CH_BED_BD*	Densidad aparente para el sedimento del lecho del canal ($\text{g}\cdot\text{cc}^{-1}$)	1.5
CH_BNK_KD*	Erodabilidad de sedimento del banco del canal ($\text{cm}^3\cdot\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$)	0
CH_BEK_KD*	Erodabilidad de sedimento del lecho del canal (μm)	0

CH_BNK_D50*	Diámetro medio de partículas del sedimento del banco del canal (μm)	50
CH_BED_D50	Diámetro medio de partículas del sedimento del lecho del canal (μm)	500
CH_BNK_TC*	Tensión de cizallamiento crítico del banco del canal ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	0
CH_BED_TC*	Tensión de cizallamiento crítico del lecho del canal ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	0
CH_EQN	Método de ruteo de sedimento	Default

*Valores asignados por default por el programa SWAT. †Toma los valores de Alpha_bf.gw

4.3.10. Subcuenca

Dentro de la modelación hidrológica se ingresaron a nivel subcuenca los datos que se indican en el Cuadro 57.

Cuadro 57. Parámetros hidrológicos requeridos para la variable subcuenca (.Sub).

Parámetro	Descripción	Valor
SUB_KM	Área de la subcuenca (km^2)	Calculado por SWAT
SUB_LAT	Latitud de la subcuenca (grados)	Calculado por SWAT
SUB_ELEV	Elevación de la subcuenca (m)	Calculado por SWAT
PLAPS*	Gradiente de precipitación ($\text{mm}\cdot\text{km}^{-1}$)	0
TLAPS*	Gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)	0
SNO_SUB* (opcional)	Contenido inicial de agua en nieve (mm)	0
CH_L(1)*	Longitud del canal "tributario" más largo en la subcuenca (km)	Calculado por SWAT
CH_S(1)*	Pendiente promedio de los canales tributarios	Calculado por SWAT
CH_W(1)*	Anchura promedio de los canales tributarios	Calculado por SWAT
CH_K(1)*	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal tributario	30
CH_N(1)*	Coefficiente de Manning "n" para los canales tributarios	0.04

*Valores asignados por default por el programa SWAT.

4.3.11. Unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Una variable importante en la modelación es la correspondiente a las propiedades de las unidades de respuesta hidrológica (HRU), en la cual se incluyeron los datos expresados en el Cuadro 58.

Cuadro 58. Parámetros hidrológicos ingresados para la variable HRU.

Parámetro	Descripción	Valor
HRU_FR	Fracción del área de la subcuenca contenida en la HRU ($\text{km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$)	Calculado por SWAT
SLSUBBSB	Longitud promedio de la pendiente (m)	Default
HRU_SLP	Promedio de pendiente abrupta ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	Calculado por SWAT
OV_N	Valor "n" Manning para flujo superficial	Dependiendo del tipo de vegetación
LAT_TIME*	Tiempo de viaje de flujo lateral (días)	0
LAT_SED*	Concentración de sedimentos en flujo lateral y subterráneo	0
SLSOIL*	Longitud de la pendiente para flujo lateral subsuperficial (m)	0
CANMX*	Almacenamiento máximo de dosel (mm)	0
POT_FR*	Fracción de área de la HRU que drena dentro de depresiones de almacenamiento	0
FLD_FR*	Fracción del área de la HRU que drena dentro de la llanura de inundación	0
RIP_FR*	Fracción del área de la HRU que drena dentro del área riparia	0
DEM_IMP*	Profundidad a la capa impermeable en el perfil del suelo (mm)	6000
EV_POT*	Coeficiente de evaporación de depresiones	0.5
DIS_STREAM*	Distancia promedio a la corriente (m)	35

*Valores asignados por default por el programa SWAT.

4.3.12. Parámetros generales de cuenca

Dentro de la modelación hidrológica se ingresaron a nivel general de cuenca los datos que se muestran en el Cuadro 59.

Cuadro 59. Parámetros hidrológicos ingresados de la variable .Bsn.

Parámetro	Descripción	Valor
MÉTODO DE ETP	Método de cálculo de evapotranspiración	Hargreaves
ESCO*	Factor de compensación de evaporación del suelo	0.95
EPCO*	Factor de compensación de absorción de las plantas	1
EVLAI*	Índice de área foliar en que la evaporación de la superficie no ocurre	3
FFCB*	Contenido inicial de agua en el suelo expresado como una fracción del contenido de agua a capacidad de campo	0
MÉTODO DE PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO	Método de cálculo de escurrimientos	Número de curva - Green & Ampt
ICN	Método de cálculo para la curva número diaria	Plant ET Method
CNCOEF*	Coeficiente del Plant ET Method	1
SURLAG*	Coeficiente de retraso del escurrimiento superficial	4
ISED_DET	Código que rige el cálculo de la lluvia máxima diaria en media hora	Monthly Max
ADJ_PKR*	Factor de ajuste de la velocidad pico para el enrutamiento de sedimentos en la subcuenca	1
PRF*	Factor de ajuste de la velocidad pico para el enrutamiento de sedimentos en el cauce principal	1
SPCON*	Parámetro lineal para el cálculo de la máxima cantidad de sedimento que puede reingresar durante el tránsito de sedimento en el cauce.	0.0001

SPEXP	Parámetro exponencial para el calcular el sedimento reentrante en el cauce	1.5
MÉTODO DE RUTEO DE CAUCE	Método de tránsito en cauces	Muskingum
MSK_CO1*	Coeficiente de calibración usado para el control del impacto de la constante de tiempo de almacenamiento para flujo normal	0.75
MSK_CO2*	Coeficiente de calibración usado para el control del impacto de la constante de tiempo de almacenamiento para flujo bajo	0.25
MSK_X*	Factor de peso Muskingum	0.2
TRNSRCH*	Fracción de las pérdidas de transmisión que entran al acuífero profundo	0
EVRCH*	Factor de ajuste de evaporación del río	1
SMXCO*	Factor de ajuste para el máximo factor S de número de curva	1
IDIST	Código de distribución de la lluvia usado para generar la precipitación diaria	Skewed

*Valores asignados por default por el programa SWAT.

4.3.13. Lineamientos de los procesos de cálculo

SWAT presenta diferentes posibilidades de cálculo para los principales procesos del ciclo hidrológico. En función de los datos disponibles y de la discretización de la cuenca se eligió la siguiente configuración para la estimación de los escurrimientos y sedimentos:

1. Inicio de la etapa de calibración: 1 de enero de 2002.
2. Fin de la etapa de calibración: 31 de diciembre de 2009.
3. Inicio de la etapa de validación: 1 de enero de 2011.
4. Fin de la etapa de validación: 31 de diciembre de 2011.
5. Inicio del periodo de simulación 1976 a 1985: 1 de enero de 1976.
6. Fin del periodo de simulación 1976 a 1985: 31 de diciembre de 1985.

7. Método de estimación de la evapotranspiración potencial (ETP): Dentro de la modelación hidrológica SWAT se puede calcular según el método de Penman-Monteith (Monteith, 1965), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) o Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985); en este trabajo se aplicó el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985).
8. Método de cálculo de escurrimiento superficial: Para el primer y segundo periodo de simulación se utilizó el método de número de curva SCS (SCS, 1972) con la implementación del método de evapotranspiración de la planta como parámetro de retención (ICN).
9. Aplicación del método de Green & Ampt (Green & Ampt, 1911) para el cálculo de escurrimientos, para el periodo 2008 a 2011 y su comparación con los resultados del método de número de curva.
10. Método de cálculo de sedimentos: Para los años de registro de sedimentos del periodo 1976 a 1985 se utilizó la metodología MUSLE (Williams, 1995), con el método de número de curva para los escurrimientos.
11. Simulación a paso mensual y anual.

4.3.14. Proceso de calibración y análisis de sensibilidad e incertidumbre

En el presente trabajo se usó el algoritmo SUFI-2, dentro de las opciones SWAT-CUP (Abbaspour *et al.*, 2004; Abbaspour *et al.*, 2007) para el proceso de calibración. Para modelos de gran escala que requieren mucho tiempo, SUFI-2 fue encontrado bastante eficiente (Yang *et al.*, 2008). Este algoritmo asigna todas las incertidumbres (parámetros, modelo conceptual, entradas, etc.) de los parámetros (expresados como distribuciones uniformes o rangos) y trata de capturar la mayor parte de los datos medidos dentro de la predicción de incertidumbre del 95% (95PPU) del modelo en un proceso iterativo.

El 95PPU se calcula a los 2.5 % y 97.5 % niveles de la distribución acumulada de una variable de salida mediante el muestreo hipercubo latino (McKay *et al.*, 1979), este método conduce a n combinaciones de parámetros, donde n es el número de simulaciones. Una vez establecidas las variables a calibrar se desarrolló el proceso de análisis de sensibilidad global, seleccionando las variables de mayor importancia en la modelación bajo los criterios establecidos en el manual SWAT-CUP (Abbaspour, 2015). Finalmente se obtuvieron los valores de los parámetros p-factor y r-factor como indicadores de la calidad del modelo, mismos que definirán para futuros estudios o investigaciones la efectividad de otros modelos.

Para efectuar análisis de sensibilidad y calibración, en el Cuadro 60 se muestran los rangos de variación propuestos para cada parámetro a paso mensual. Estos valores posteriormente modifican a los parámetros del modelo según el tipo de cambio que se haya seleccionado en la calibración {adición (a), multiplicación (r) o reemplazo (v)}, en general para este estudio se consideró un rango de variación del 10 %, exceptuando aquellos que por características propias se les definió rangos establecidos en el manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

Cuadro 60. Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad durante el periodo 2002 a 2009 con la metodología de número de curva.

Parámetro	Método de variación	Rango de variación
ESCO.bsn	V	0.5 - 1
EPCO.bsn	V	0.5 - 1
CNCOEF.bsn	V	0.05 - 2
SURLAG.bsn	R	10 %
MSK_CO1.bsn	R	10 %
MSK_CO2.bsn	R	10%

MSK_X.bsn	R	10 %
SMXCO.bsn	V	1 - 10
CH_N2.rte	V	0.03 - 0.05
CH_K2.rte	R	20 %
CH_COV1.rte	V	5.4 - 19.2
CH_COV2.rte	V	5.4 - 19.2
GW_DELAY.gw	R	10 %
GWQMN.gw	V	1000 - 3000
GW_REVAP.gw	V	0.02 - 0.2
REVAPMN.gw	V	300 - 1000
RCHRG_DP.gw	V	0 - 1
ALPHA_BF.gw	R	10 %
GW_SPYLD.gw	R	0.01 - 0.04
ALPHA_BF_D.gw	V	0.01 - 1
CN2.mgt - LAND USE SWAT	R	10 %
CN2.mgt - URLM	V	96 - 98
SOL_K.sol	R	10 %
SOL_AWC.sol	R	10 %
SOL_ALB.sol	R	10 %
OV_N.hru - AGRR, AGRL	V	0.16 - 0.22
OV_N.hru - RNGE	V	0.06 - 0.12
OV_N.hru -FRSE, PINE, OAK, FRSD, FRST	V	0.17 - 0.3
SLSUBBSN.hru	R	10 %
LAT_TTIME.hru	V	0 - 180
SLSOIL.hru	V	0 - 150
CH_K1.sub	R	20 %
CH_N1.sub	V	0.03 - 0.05
DEEPST.gw	R	10 %
SOL_BD.sol	R	10 %
SOL_CBN.sol	R	10 %
SOL_Z.sol	R	10 %

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características de la cuenca

Este estudio la cuenca de 965.37 km² fue dividida en 41 subcuencas (Figuras 54 y 55), siendo integradas 195 HRU para el periodo 1976 a 1985 y 171 HRU para el periodo 2002 a 2011; en los Cuadros 61 y 62 se muestra sus principales características topográficas y morfológicas.

Cuadro 61. Área y pendiente de las subcuencas presentes.

Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente media (%)	Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente media (%)
1	21.3	13.0	22	19.6	20.8
2	42.2	13.8	23	6.5	5.4
3	18.7	4.6	24	5.7	6.0
4	43.5	30.2	25	20.9	7.2
5	34.7	10.2	26	9.5	5.4
6	29.3	7.5	27	6.4	8.3
7	3.8	7.9	28	23.2	8.0
8	13.7	7.1	29	28.0	25.0
9	51.2	16.7	30	94.3	11.4
10	27.8	35.1	31	3.9	3.6
11	20.3	14.8	32	1.0	7.4
12	35.8	12.9	33	16.4	31.6
13	68.7	20.2	34	15.9	10.6
14	0.2	5.3	35	53.6	8.8
15	19.1	11.5	36	15.8	14.3
16	50.6	13.5	37	29.0	25.4
17	15.8	9.1	38	4.9	11.7
18	8.4	11.6	39	14.9	20.8
19	41.3	27.8	40	2.5	20.9
20	15.7	18.4	41	23.7	16.9
21	7.4	12.7			

Cuadro 62. Parámetros morfológicos generales de la cuenca de estudio.

Parámetro	Periodo 1976 - 1985	Periodo 2002 - 2011	Elevación (m)
Precipitación promedio anual (mm)	1053.3	1124.8	Max. cauce: 4013
[‡] Pendiente media ponderada (%)		15.82	Min. cauce: 980
[‡] Longitud del cauce principal (km)		79.10	*Tc: 6.76 h
[‡] Pendiente media del cauce principal (m·m ⁻¹)		0.038	[‡] Dd: 0.91 km·km ⁻²

*Tc: Tiempo de concentración Kirpich (Aparicio, 2001); [‡]Dd: Densidad de drenaje; [‡]Campos (1998).

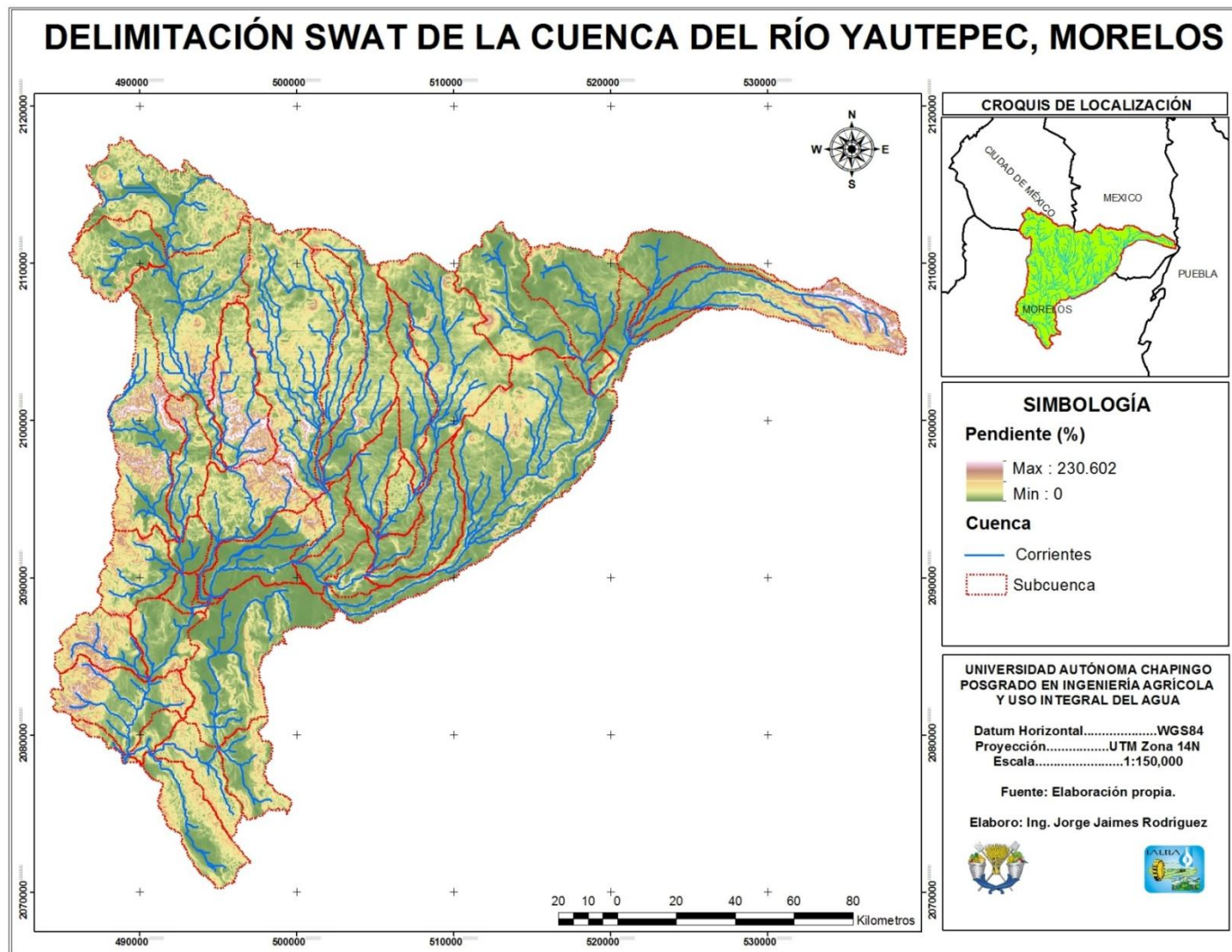


Figura 54. Delimitación SWAT de la cuenca de estudio.

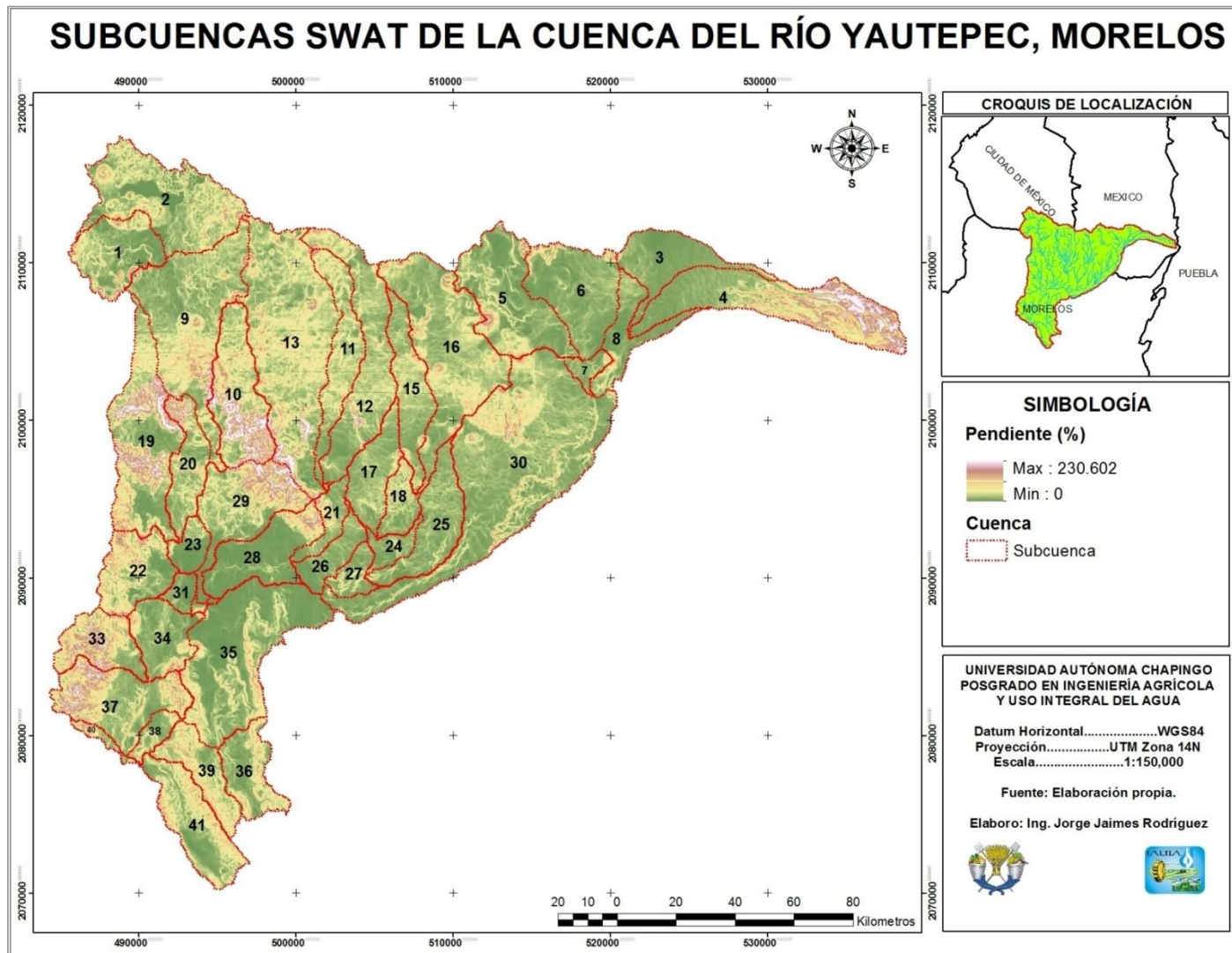


Figura 55. Identificación de las subcuencas presentes en la cuenca de estudio.

Posteriormente se realizó un análisis de la aportación de agua de cada una de las subcuencas al cauce principal, por medio de la variable de salida expresada en mm "WYLD" (escurrimiento + contribución de flujo lateral + contribución de acuíferos - pérdidas de transmisión - abstracciones de almacenamiento) (Figuras 56 y 57).

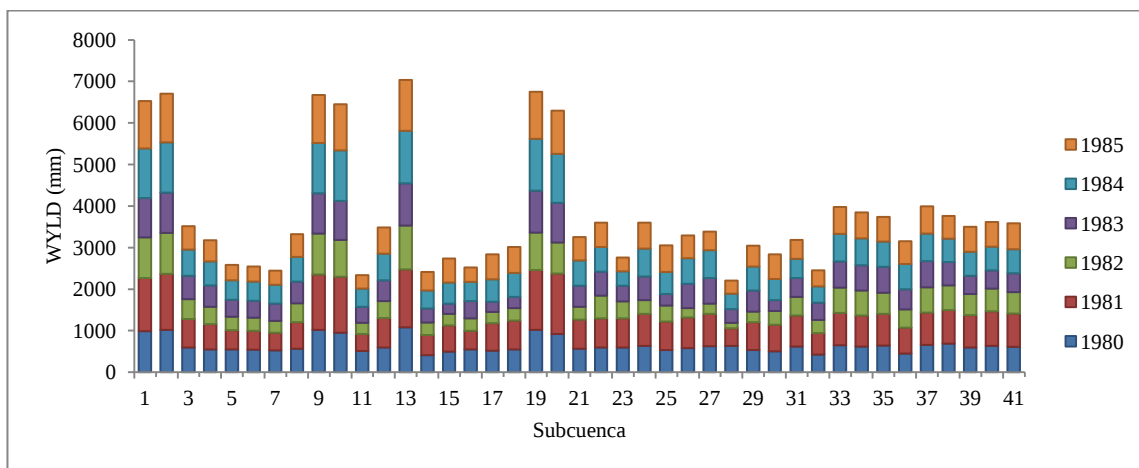


Figura 56. Cantidad total anual de agua que sale de las HRU a nivel subcuenca y entra en el cauce principal de 1980 a 1985.

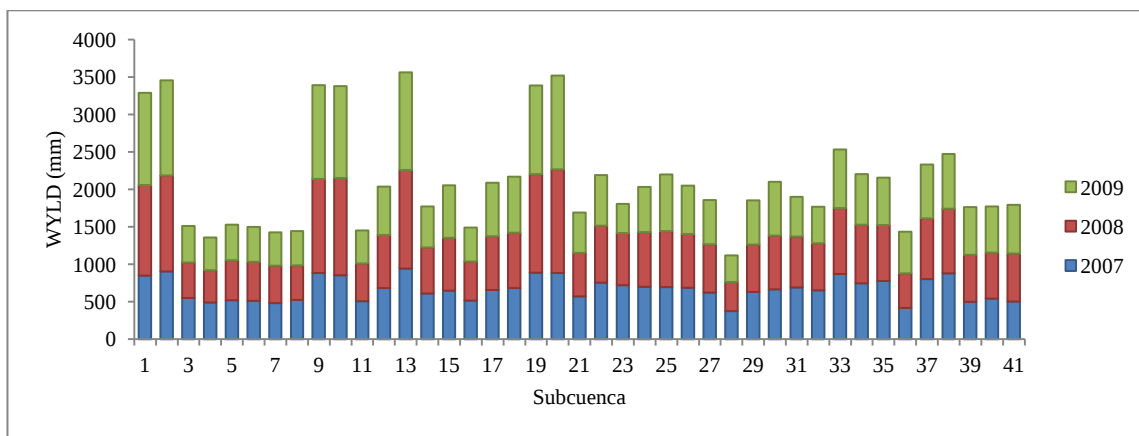


Figura 57. Cantidad total anual de agua que sale de las HRU a nivel subcuenca y entra en el cauce principal de 2007 a 2009.

De las figuras anteriores se deduce que las subcuencas 1, 2, 9, 10, 13, 19 y 20 son las que contribuyen significativamente a la corriente principal, lo que indica que en futuras investigaciones se deben de centrar los esfuerzos en el ingreso y representación espacial de los parámetros SWAT en la cuenca de estudio, especialmente en estas áreas.

5.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo del periodo de simulación de escurrimientos 2002 a 2011 con número de curva

Para los procesos de calibración y validación, el periodo 2002 a 2011 fue separado en dos series de tiempo, siendo los años 2002 a 2009 considerados como etapa de calibración y el año 2011 como etapa de validación.

5.2.1. Etapa de calibración mensual 2002 a 2009 con número de curva

Se utilizó datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas a nivel diario. Los primeros cinco años fueron reservados para la "fase de calentamiento", siendo del 2007 a 2009 en los cuales se evaluó los escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual.

Los cálculos de escurrimientos fueron realizados con la metodología de número de curva; al no existir registros de sedimentos en este periodo en la estación hidrométrica no se calculó este parámetro.

En el Cuadro 63 se muestran los valores de t-stat (medida del grado de sensibilidad) y de p-valúe (significancia de la sensibilidad), siguiendo los criterios de selección establecidos en el manual teórico SWAT-CUP (Abbaspour, 2015), así como el ranking de sensibilidad para esta etapa de simulación.

Cuadro 63. Parámetros con influencia en el proceso de calibración de 2002 a 2009.

Parámetro	t-stat	p-valúe	valor ajustado	ranking
RCHRG_DP.gw	7.55	0.00	0.5285	1
CH_K2.rte	-7.47	0.00	- 19.5 %	2
ALPHA_BF_D.gw	4.43	0.00	0.729235	3
CH_N2.rte	-4.13	0.00	0.031150	4
SLSOIL.hru	1.95	0.05	2.6250	5
SMXCO.bsn	1.86	0.06	8.7085	6
OV_N.hru - AGRR, AGRL	-1.77	0.08	0.176950	7

SOL_ALB.sol	1.61	0.11	- 4.41 %	8
ALPHA_BF.gw	1.53	0.13	6.09 %	9
CN2.mgt - URLM	-1.51	0.13	96.275002	10
CN2.mgt - FRST	-1.48	0.14	5.33 %	11
LAT_TTIME.hru	1.44	0.15	100.890007	12
CH_K1.sub	1.43	0.15	3.86 %	13
CN2.mgt - FRSD	1.22	0.22	8.57 %	14
REVAPMN.gw	1.20	0.23	946.450012	15
GW_DELAY.gw	1.12	0.26	- 4.35 %	16
ESCO.bsn	-1.09	0.28	0.966250	17
SLSUBBSN.hru	-1.09	0.28	0.083 %	18
MSK_CO1.bsn	1.08	0.28	-1.11 %	19
EPCO.bsn	1.08	0.28	0.508750	20
SOL_CBN.sol	-1.03	0.30	- 6.13 %	21
OV_N.hru - RNGE	-0.89	0.37	0.083130	22
GWQMN.gw	0.81	0.42	1607.00	23
DEEPST.gw	0.74	0.46	-4.99 %	24
CN2.mgt - AGRL	-0.62	0.54		
CNCOEF.bsn	0.62	0.54		
CH_COV2.rte	-0.58	0.56		
CN2.mgt - RNGE	-0.55	0.58		
GW_REVAP.gw	-0.52	0.60		
CN2.mgt- PINE	-0.45	0.65		
GW_SPYLD.gw	-0.44	0.66		
MSK_X.bsn	-0.44	0.66		
MSK_CO2.bsn	-0.37	0.71		
OV_N.hru - FRSE, PINE, OAK, FRSD, FRST	0.34	0.73		
SOL_Z.sol	0.33	0.74		
CN2.mgt - AGRR	0.32	0.75		
SOL_K.sol	0.31	0.75		
SURLAG.bsn	0.21	0.84		
SOL_BD.sol	-0.20	0.84		

CH_COV1.rte	-0.18	0.86
CH_N1.sub	-0.14	0.89
SOL_AWC.sol	-0.12	0.90
CN2.mgt - FRSE	0.06	0.95

En este análisis de sensibilidad se muestra los 24 parámetros que durante el proceso de calibración propuesto influyeron de manera significativa, siendo la importancia reflejada por aquellos que presentaron valores de $p\text{-value} < 0.5$.

Posteriormente el valor de CH_K1.sub fue ajustado al valor de CH_K2.rte para presentar una correspondencia con los valores de conductividad hidráulica del cauce principal y los cauces secundarios.

El parámetro RCHRG_DP.gw (Fracción de percolación al acuífero profundo) resultó ser el más sensible para la calibración mensual de los escurrimientos, siguiendo en importancia los parámetros CH_K2.rte, ALPHA_BF_D.gw, CH_N2.rte, hasta llegar al parámetro DEEPST.gw, relacionados al transporte de agua y sedimentos, agua subterránea, longitud de la pendiente para el flujo lateral, cobertura vegetal, etc.

Esto indica que se debe de prestar especial atención en obtener de una mayor cantidad de información relacionada a los acuíferos, características de conductividad hidráulica del cauce principal y el coeficiente de Manning (sin menospreciar los demás parámetros), los cuales indican que un cambio en los valores de los mismos, genera un alto impacto en el proceso de simulación.

Para obtener la optimización final de parámetros se necesitaron 1000 simulaciones en cada ejecución; como resultado final se obtuvo un **NSE (Índice de Nash) de 0.79** y **R^2 de 0.81**, ubicándolo como "**Muy buen modelo**" para la estimación de escurrimientos a nivel mensual dentro de la clasificación de Moriasi *et al.*, (2007).

La bondad del ajuste de la calibración mensual se evaluó con los factores p y r, siendo generados por el programa SWAT-CUP un **factor-p de 0.71** y un **factor-r de 0.61**, considerándolos como aceptables, el factor-p de 0.71 significa que el 71% de los datos están acotados están dentro del 95% de predicción de incertidumbre, siendo el factor-r el espesor medio de la banda de incertidumbre de 95PPU dividida por la desviación estándar de los datos medidos. En la calibración se trata de mantener la mayor cantidad de datos observados dentro de la banda de incertidumbre (con un factor-p cercano a 1) y con el mínimo valor posible del factor-r (cercano a cero). Estos datos servirán como referencia para futuras investigaciones, y diagnosticar el éxito de los procesos de calibración. En el Cuadro 64 se reportan los gastos medios mensuales medidos en la estación hidrométrica y los simulados por el modelo SWAT para los años evaluados.

Cuadro 64. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel mensual de 2007 a 2009.

Año	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.006	0.010	0.005	0.078	0.017	1.406	2.967	4.512	7.510	0.105	0.161	0.005
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.226	2.375	3.027	5.020	0.170	0.000	0.000
2008	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.005	0.005	0.089	0.005	0.008	3.652	5.030	6.695	9.690	0.299	0.072	0.035
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.627	2.040	7.875	8.588	0.681	0.000	0.000
2009	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.378	1.089	1.235	5.790	1.178	0.109	0.049
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.214	0.284	0.456	1.002	10.580	1.431	0.155	0.000

En la Figura 58 se representa la dinámica y la magnitud del gasto medio mensual de la etapa de calibración, siendo evaluados los datos medidos y simulados de los años 2007 a 2009; los valores mensuales simulados presentan una tendencia similar a la de los registros en la estación hidrométrica, aunque es subestimado el gasto medio mensual durante la temporada de estiaje; presentando en el año 2009 una sobreestimación del mismo.

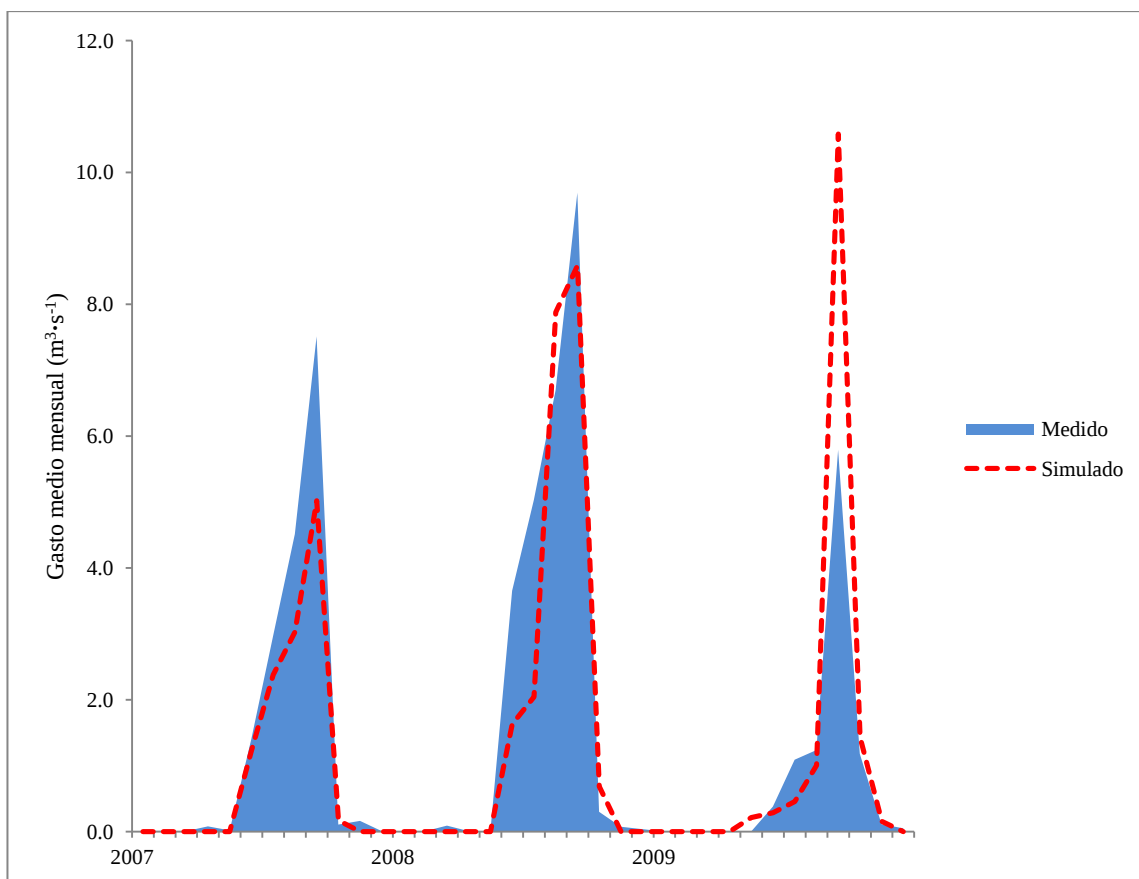


Figura 58. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2007 a 2009.

En la Figura 59 se presenta el análisis de regresión entre los datos de los gastos medidos y simulados por el modelo a nivel mensual durante la etapa de calibración; definiendo Q_s como gasto simulado, Q_m es el gasto medido.

El análisis de regresión presenta un ajuste favorable entre los valores medidos en la estación hidrométrica y simulados por el modelo, lo que indica que la dispersión simulada se acerca a la dispersión medida.

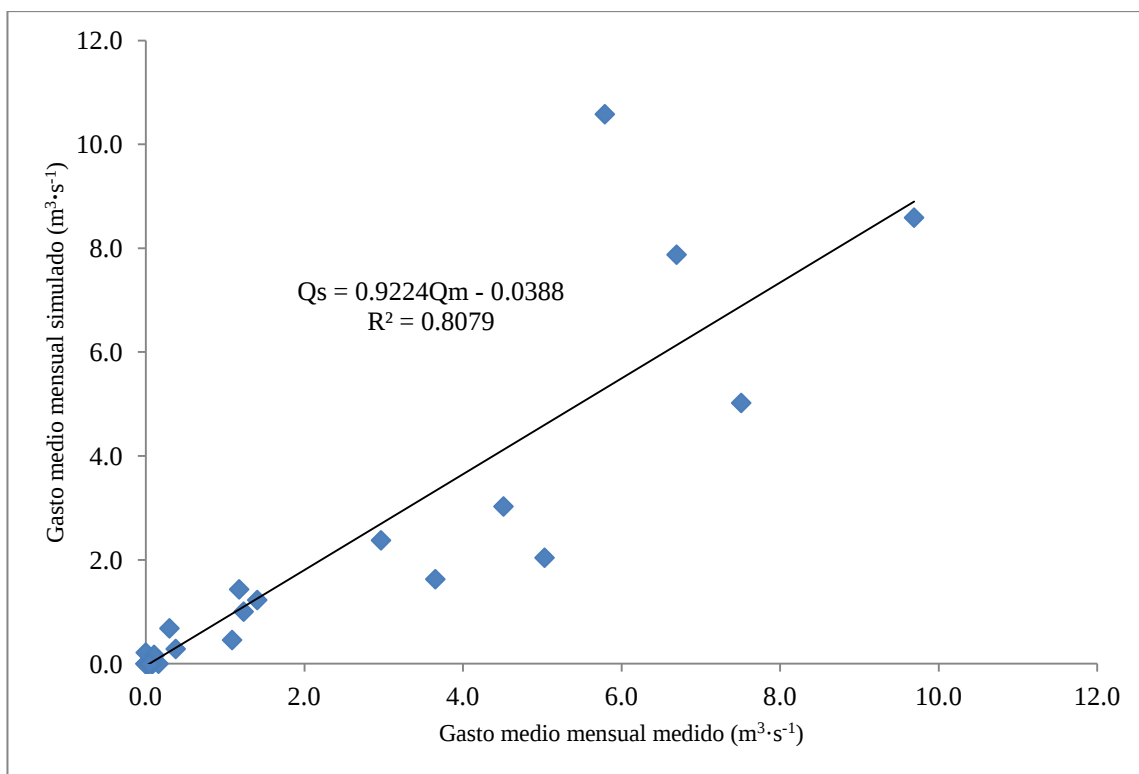


Figura 59. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2007 a 2009.

5.2.2. Etapa de simulación anual 2002 a 2009 con número de curva

Una vez obtenidos los parámetros calibrados en la serie mensual, se realizó la simulación nivel anual de los gastos medidos y simulados en la estación Ticumán.

Los primeros cinco años fueron reservados para la "fase de calentamiento", siendo los años del 2007 a 2009 en los cuales se comparó los escurrimientos medidos y simulados.

La dinámica y magnitud de los gastos medios anuales se presentan en el Cuadro 65 y Figura 60; siendo el análisis de regresión expuesto en la Figura 61.

Cuadro 65. Gasto medio ($m^3 \cdot s^{-1}$) medido y simulado a nivel anual de 2007 a 2009.

Año	2007	2008	2009
Medido ($m^3 \cdot s^{-1}$)	1.399	2.132	0.819
Simulado ($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.987	1.735	1.169

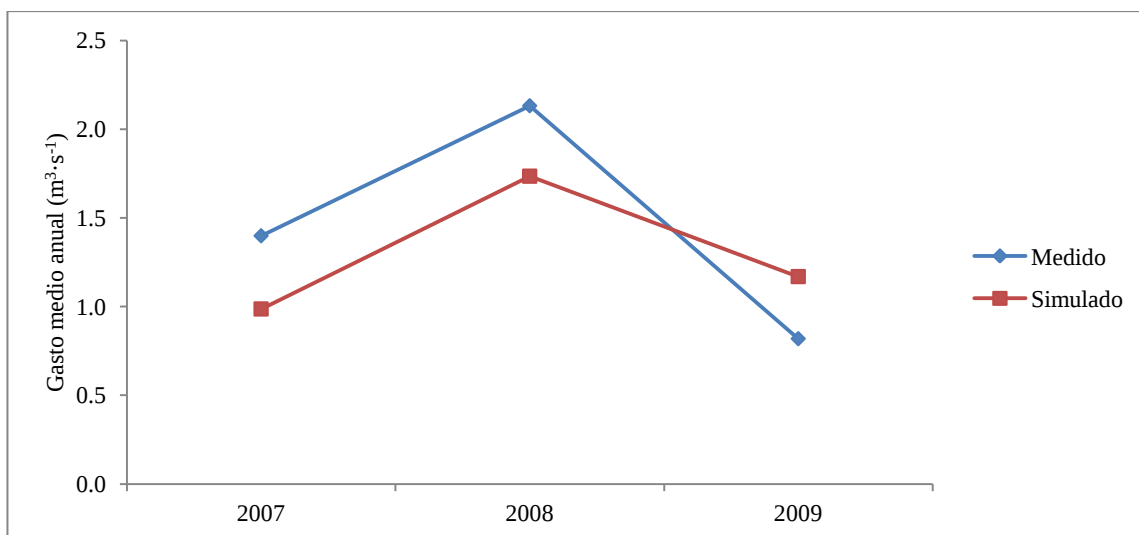


Figura 60. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 2007 a 2009.

Para el periodo anual se presentó un **NSE de 0.48** y un **R^2 de 0.59**; en este periodo baja considerablemente la capacidad de predicción de escurrimiento, debido probablemente a la cantidad reducida de datos a este nivel para realizar la comparación, siendo el modelo anual catalogado como "**Insatisfactorio**" dentro de la clasificación Moriasi *et al.*, (2007). Se observa que se reduce el ajuste presentado en el análisis de regresión a comparación de su contraparte mensual.

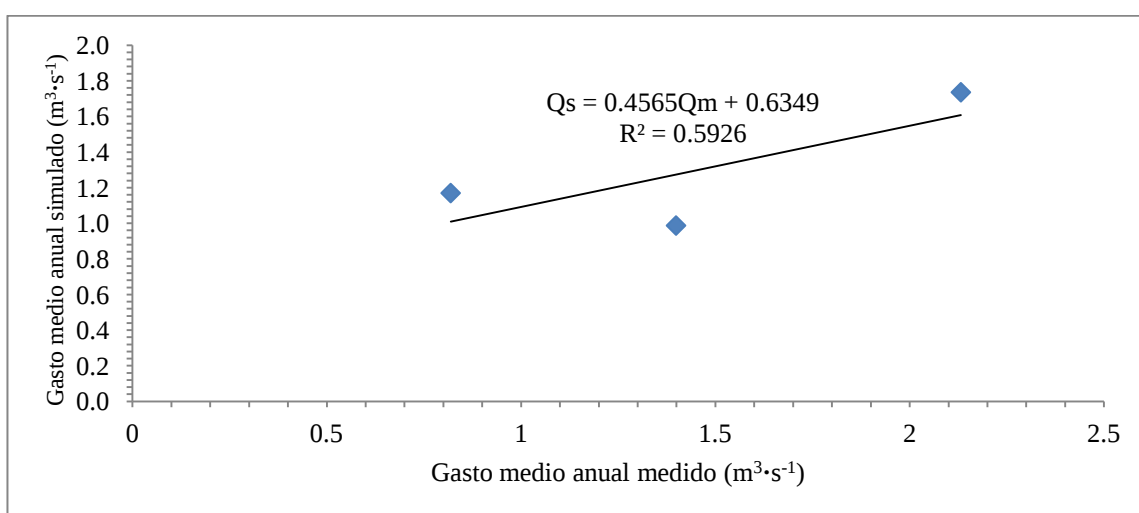


Figura 61. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 2007 a 2009.

5.2.3. Etapa de validación mensual 2011 con número de curva

En la Figura 62 se representan los valores de precipitación y escurrimiento registrados en la cuenca; se observa que en el año 2010 existe cierta incongruencia entre los datos medidos en la estación hidrométrica y los resultados de la precipitación media arrojados por SWAT, esto dio lugar a no contemplar este año para el periodo de simulación, evaluando los resultados sólo para el año 2011.

Para ejecutar el proceso de validación mensual para el año 2011 una vez calibrado el modelo, se definió los años 2002 al 2010 como "fase de calentamiento", obteniendo los resultados expresados en el Cuadro 66. La dinámica y la magnitud del gasto medio mensual se presentan en la Figura 63 y el análisis de regresión en la Figura 64.

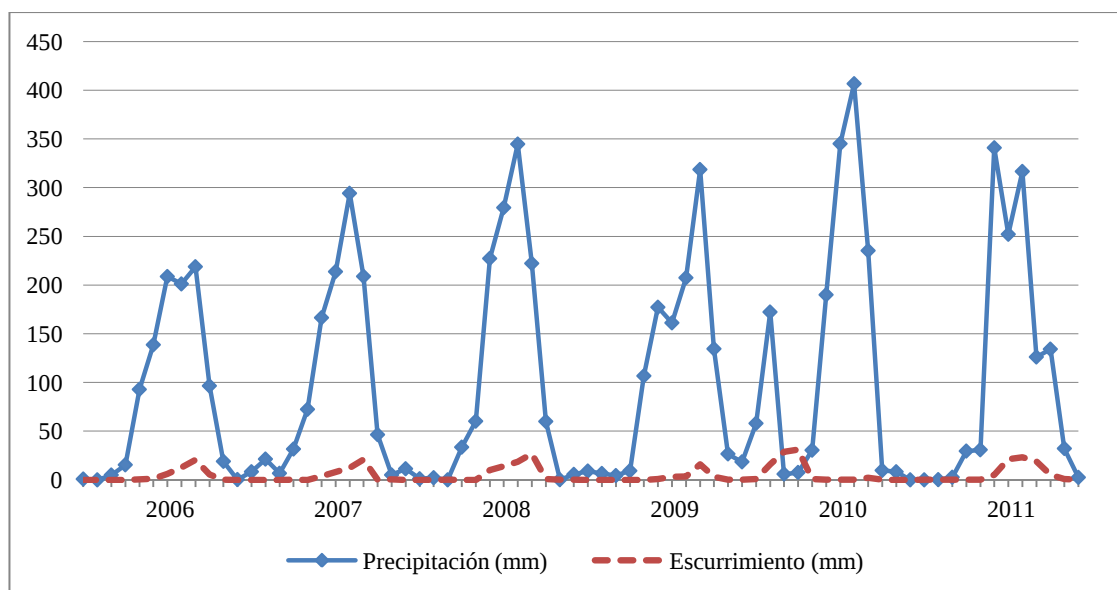


Figura 62. Comparación entre la precipitación observada en la cuenca y los escurrimientos medidos de 2006 a 2011.

Cuadro 66. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado de la etapa de validación mensual año 2011

Año	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2011	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.059	0.056	0.044	0.039	0.026	1.903	7.698	8.394	6.875	1.894	0.284	0.075
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.649	8.397	7.022	5.128	2.846	0.000	0.000

Para este periodo de validación se obtuvo un **NSE de 0.89** con un **R² de 0.89**, siendo considerado el modelo dentro de la clasificación Moriasi *et al.*, (2007) como un "**Muy buen modelo**" para la predicción de escurrimientos a nivel mensual; en el cual se observa un adelanto en el comportamiento de los gastos medios.

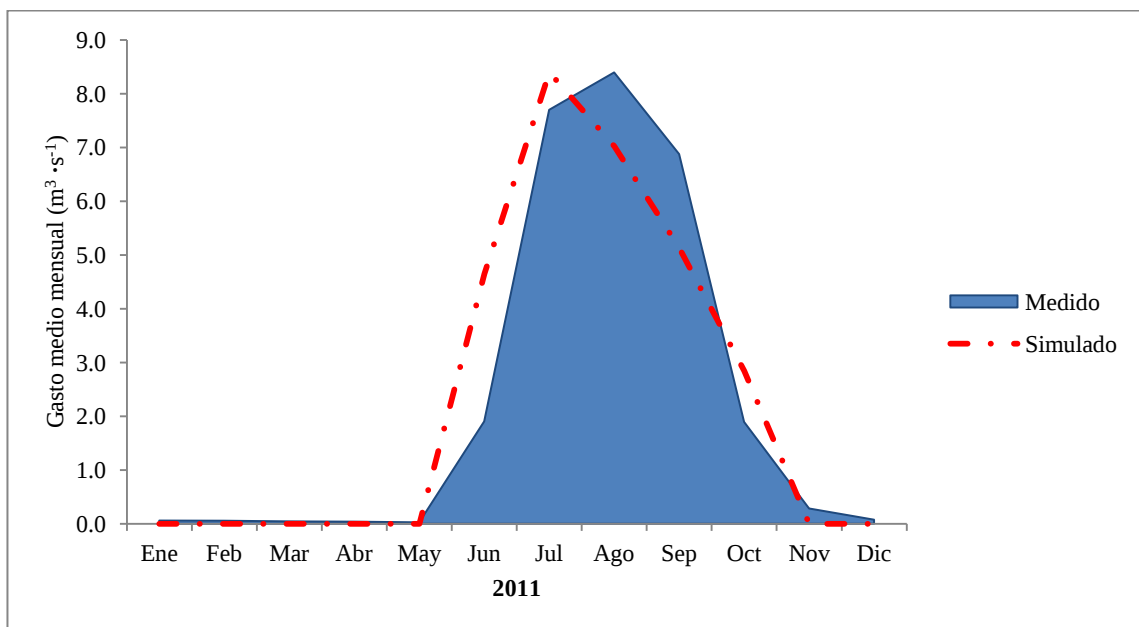


Figura 63. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT de la etapa de validación mensual año 2011.

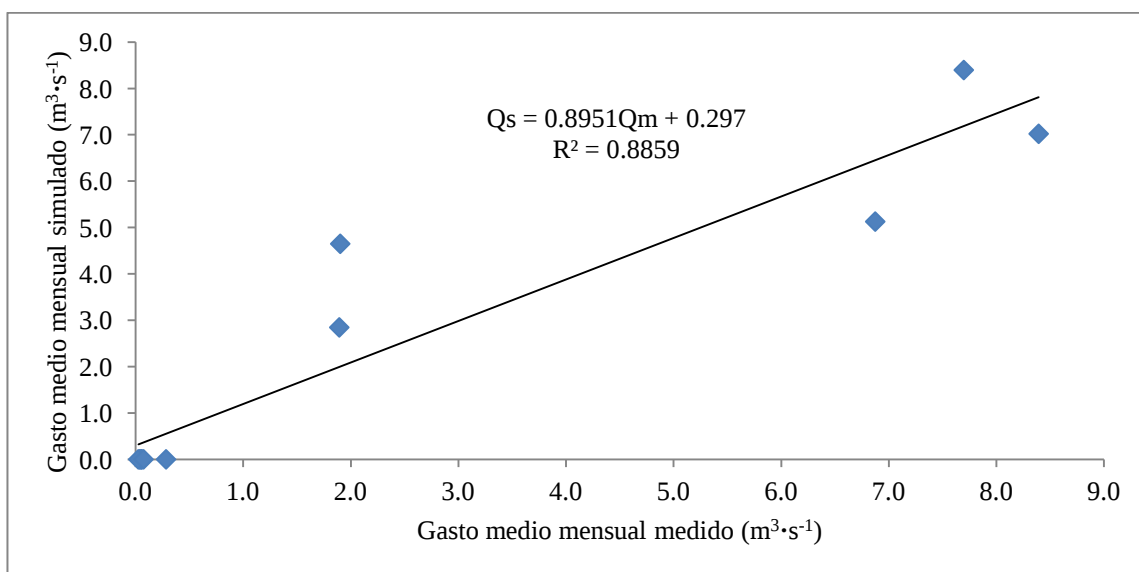


Figura 64. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT de la etapa de validación mensual año 2011.

En análisis de regresión de la figura anterior se analiza una mejor capacidad de ajuste del modelo en comparación con la etapa de calibración, aproximándose mejor a una coincidencia ideal entre los datos medidos y simulados a nivel mensual para el año 2011.

5.3. Periodo de simulación de escurrimientos 1976 a 1985 con número de curva

Para este periodo de análisis, el modelo utilizó datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas a nivel diario de 1976 a 1985. Los primeros cuatro años fueron reservados para la "fase de calentamiento", siendo evaluados los años 1980 a 1985.

El método de cálculo de escurrimientos fue el de número de curva, utilizando los parámetros calibrados de la etapa de calibración; cabe mencionar que en esta serie de tiempo no se observa incongruencia significativa entre los datos registrados en la estación hidrométrica de escurrimientos y la precipitación media en la cuenca generada por SWAT para la cuenca (Figura 65).

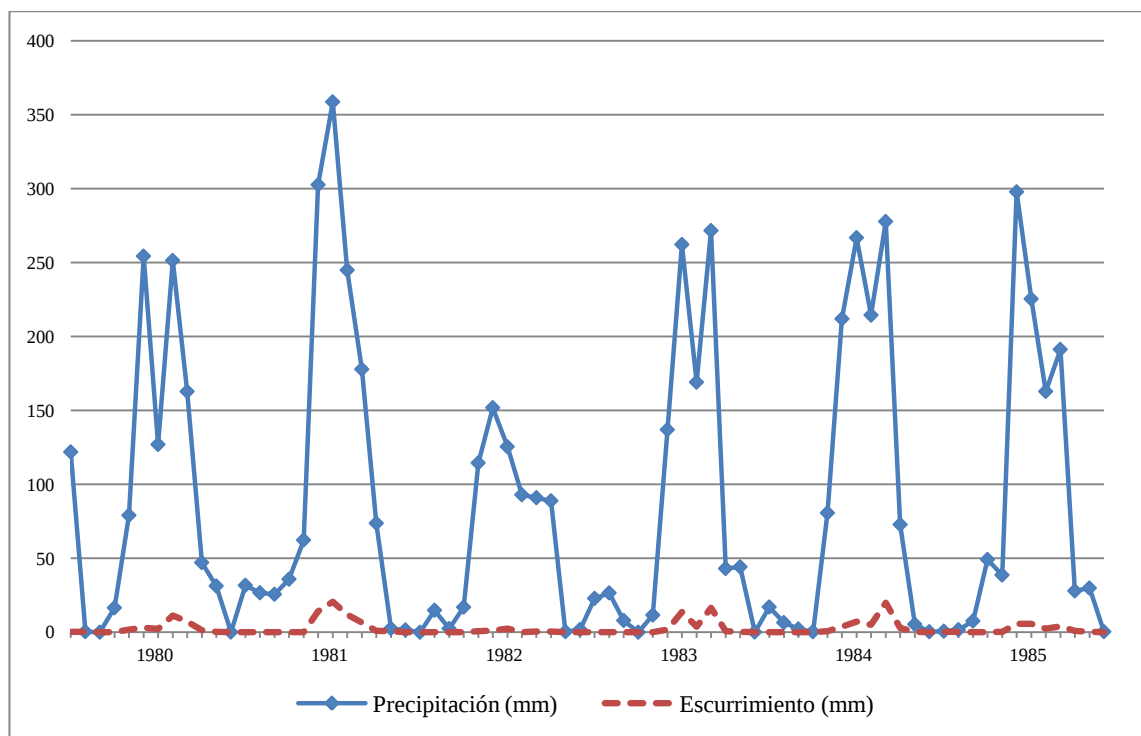


Figura 65. Comparación entre la precipitación observada en la cuenca y los escurrimientos medidos de 1980 a 1985.

5.3.1. Simulación mensual 1976 a 1985

En el Cuadro 67 se reportan los gastos medios medidos en la estación Ticumán y los simulados por el modelo SWAT. En la Figura 66 se presenta la dinámica y magnitud del gasto medio mensual para los años evaluados de 1980 a 1985.

Cuadro 67. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel mensual de 1980 a 1985.

Año	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.105	0.073	0.020	0.023	0.629	1.156	0.826	4.044	2.611	0.525	0.144	0.042
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.693	0.000	0.000	0.000	0.018	2.111	0.393	1.461	1.254	0.056	0.000	0.000
1981	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.049	0.059	0.028	0.031	0.050	5.097	7.437	4.292	2.364	0.310	0.256	0.064
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.998	4.187	6.678	5.368	0.806	0.000	0.000
1982	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.064	0.062	0.060	0.061	0.258	0.412	0.890	0.060	0.148	0.187	0.054	0.053
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.622	0.830	1.319	0.106	1.319	0.307	0.000	0.000
1983	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.066	0.054	0.046	0.045	0.040	0.672	4.969	1.333	5.946	0.277	0.144	0.034
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.369	2.049	0.602	5.062	0.006	0.000	0.000
1984	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.051	0.044	0.039	0.027	0.269	1.385	2.562	1.812	7.172	1.040	0.099	0.051
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.155	0.225	0.351	1.696	6.763	0.191	0.000	0.000
1985	Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.072	0.074	0.026	0.030	0.087	2.088	2.045	0.871	1.404	0.330	0.072	0.038
	Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.028	1.278	0.503	1.809	0.082	0.000	0.000

Al aplicar los parámetros calibrados de la etapa de calibración, para esta serie de tiempo se obtuvo un **NSE de 0.71** y **R² de 0.72**, siendo clasificado como "**Buen modelo**" dentro de la clasificación Moriasi *et al.*, (2007).

En la Figura 67 se presenta el análisis de regresión entre los datos de los gastos medios medidos y simulados por el modelo a nivel mensual durante el periodo; el cual indica que los valores mensuales simulados presentan una tendencia similar a la de los registrados en la estación hidrométrica, aunque en menor medida comparados con el periodo de calibración y validación de 2002 a 2011.

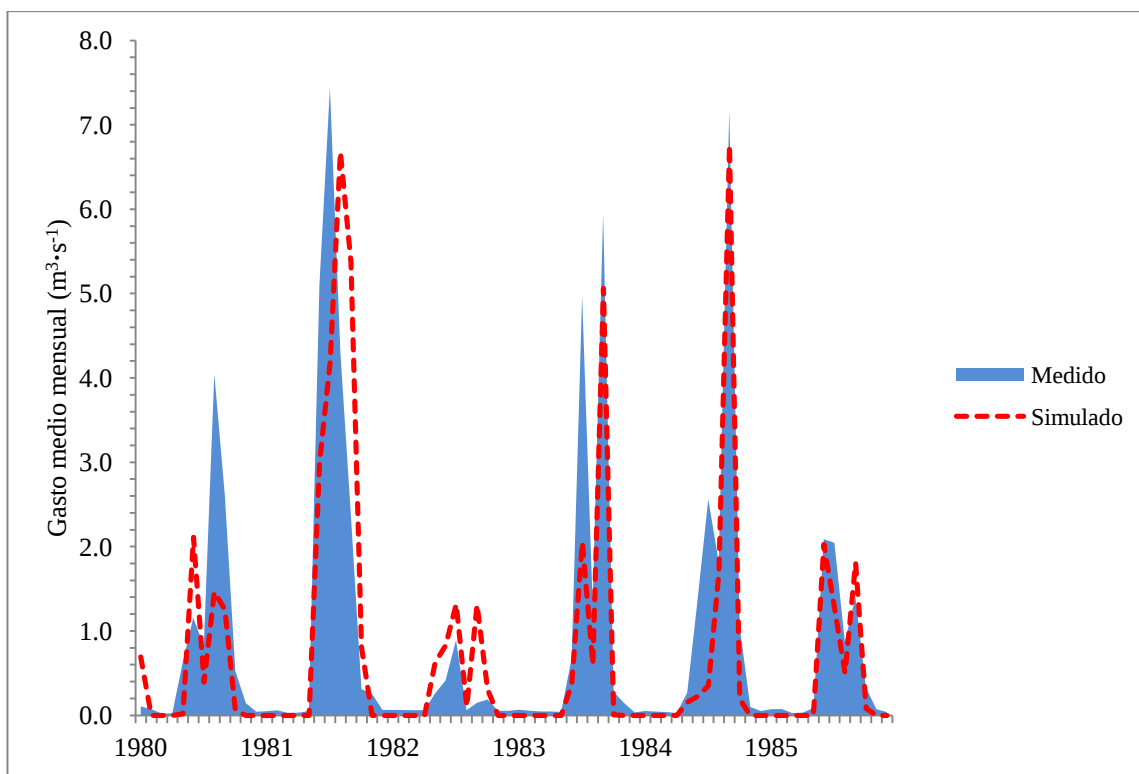


Figura 66. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.

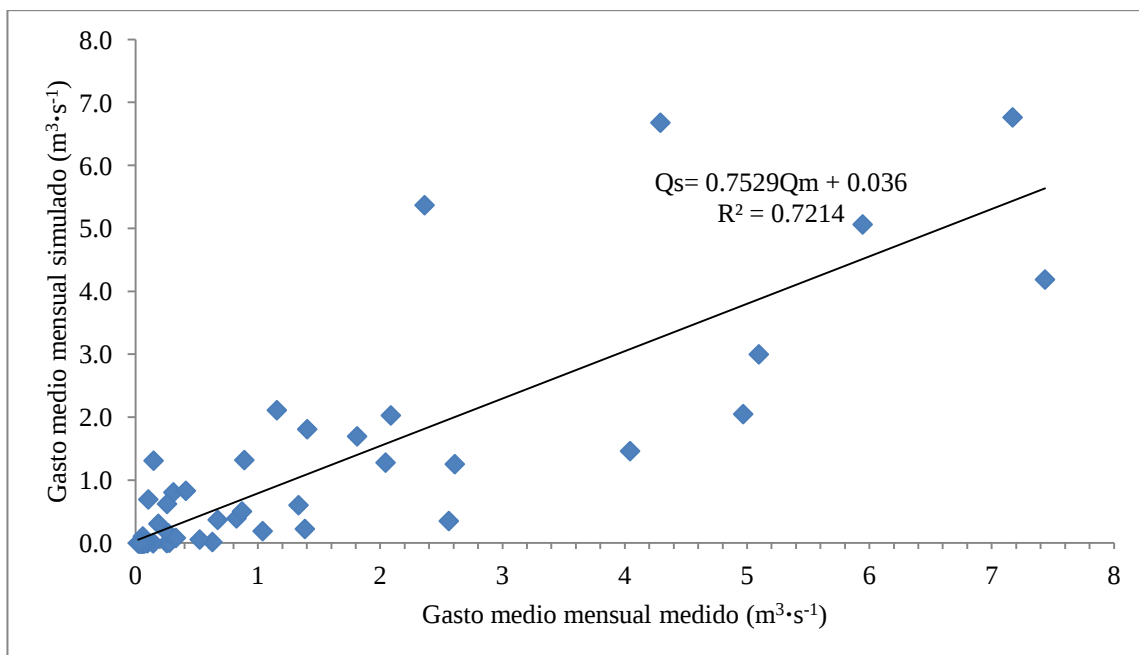


Figura 67. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.

5.3.2. Simulación anual 1976 a 1985

Se analizó el comportamiento anual del gasto medio medido y simulado en la estación Ticumán del periodo 1976 a 1985 con cuatro años de "fase de calentamiento", siendo evaluados los años 1980 a 1985 (Cuadro 68). La dinámica y magnitud del gasto se representa en la Figura 68, siendo expuesto el análisis de regresión en la Figura 69. Para este periodo anual se obtuvo un **NSE de 0.57** y un **R² de 0.75**, debido probablemente a la cantidad reducida de datos registrados a esta escala de tiempo para realizar la comparación, de lo que se deduce que los resultados mensuales presentan mejores condiciones de estimación, siendo considerado el modelo a nivel anual "**Satisfactorio**" según la clasificación de Moriasi *et al.*, (2007); arrojando en el análisis de regresión un ajuste parecido a la simulación mensual.

Cuadro 68. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado a nivel anual de 1980 a 1985.

Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Medido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.853	1.681	0.194	1.138	1.209	0.596
Simulado ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.498	1.679	0.376	0.672	0.775	0.474

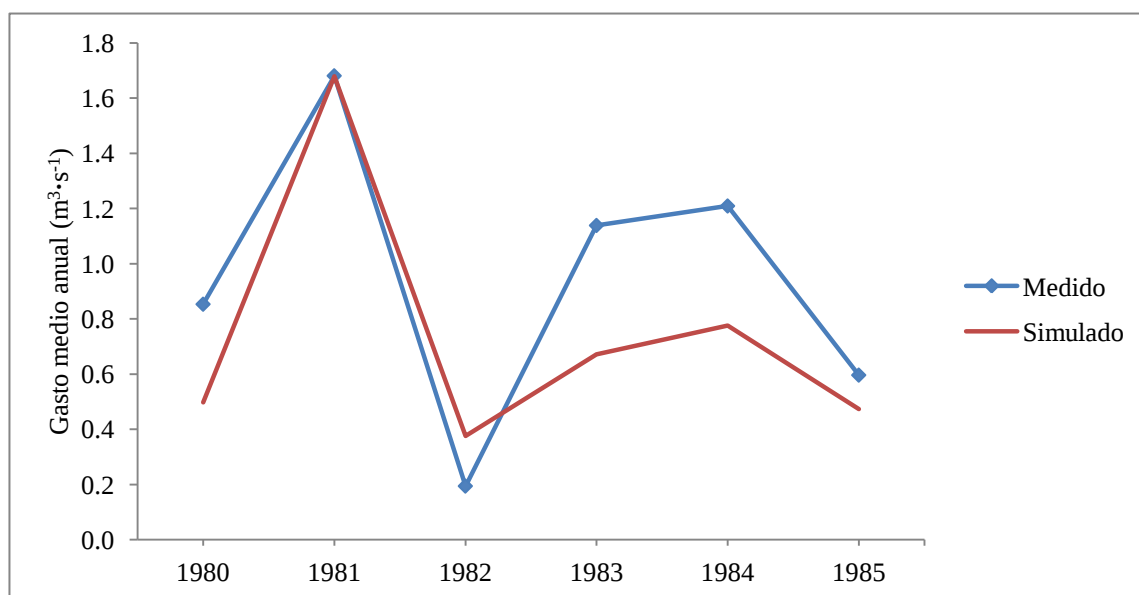


Figura 68. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.

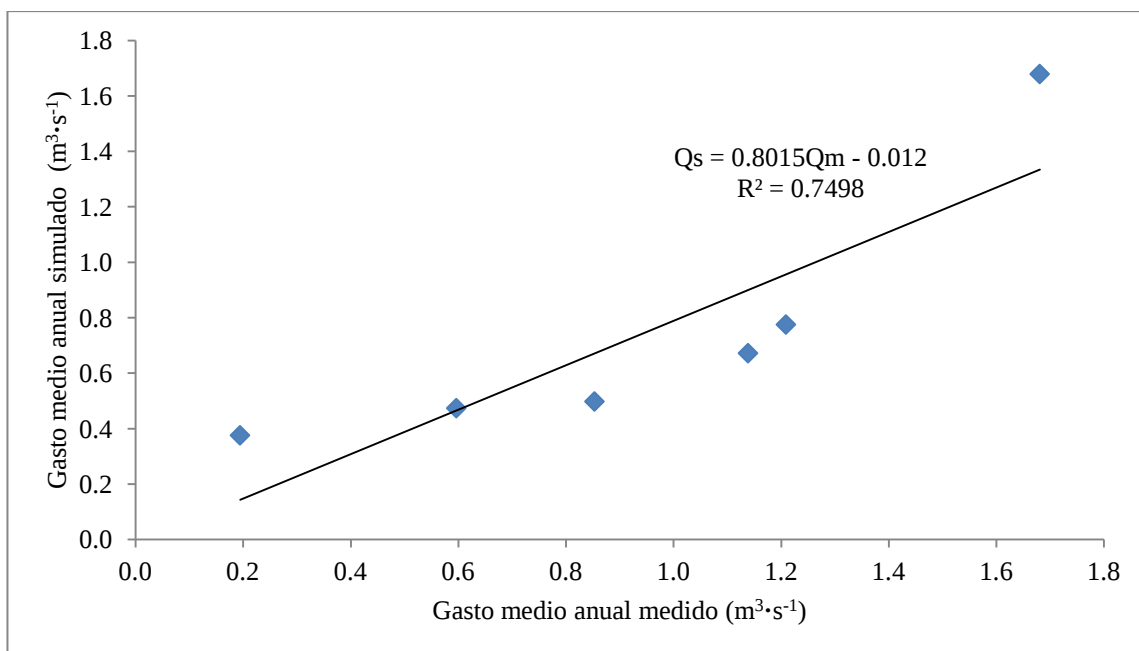


Figura 69. Comparación entre el gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.

5.4. Comparación de la predicción de escurrimientos con número de curva vs Green & Ampt del periodo de simulación mensual 2008 a 2011

Para evaluar el efecto de este método en la investigación, se utilizaron datos de precipitación subhoraria (cada 60 minutos) de las estaciones meteorológicas automáticas y temperaturas máximas y mínimas a nivel diario de 2008 a 2011 provenientes de las estaciones convencionales.

Se respetó los parámetros ajustados de la etapa de calibración 2002 a 2009, cambiando solamente el método de cálculo de escurrimientos a Green & Ampt.

Se utilizó el primer año como "fase de calentamiento", siendo evaluados los años 2009 a 2011. En el Cuadro 69 se reportan los gastos medios mensuales medidos en la estación Ticumán y los simulados por el modelo SWAT de los años 2009 a 2011.

Cuadro 69. Gasto medio ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) medido y simulado mensual con el método de Green & Ampt de 2009 a 2011.

Año	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2009	Medido (m³·s⁻¹)	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.378	1.089	1.235	5.790	1.178	0.109	0.049	
	Simulado (m³·s⁻¹)	5.560	4.409	3.385	3.022	4.661	9.719	15.140	18.610	34.720	28.960	22.250	16.590	
2010	Medido (m³·s⁻¹)	Año eliminado												
	Simulado (m³·s⁻¹)	13.390	17.530	11.890	9.222	7.277	10.390	25.820	29.280	38.440	27.110	22.160	16.460	
2011	Medido (m³·s⁻¹)	0.059	0.056	0.044	0.039	0.026	1.903	7.698	8.394	6.875	1.894	0.284	0.075	
	Simulado (m³·s⁻¹)	12.580	10.190	7.669	6.200	5.928	10.510	27.900	30.750	37.570	30.310	22.910	18.090	

En la Figura 70 se representa la dinámica y la magnitud del gasto medio mensual medido y simulado para los años evaluados de 2009 a 2011 con el método de número de curva y Green & Ampt.

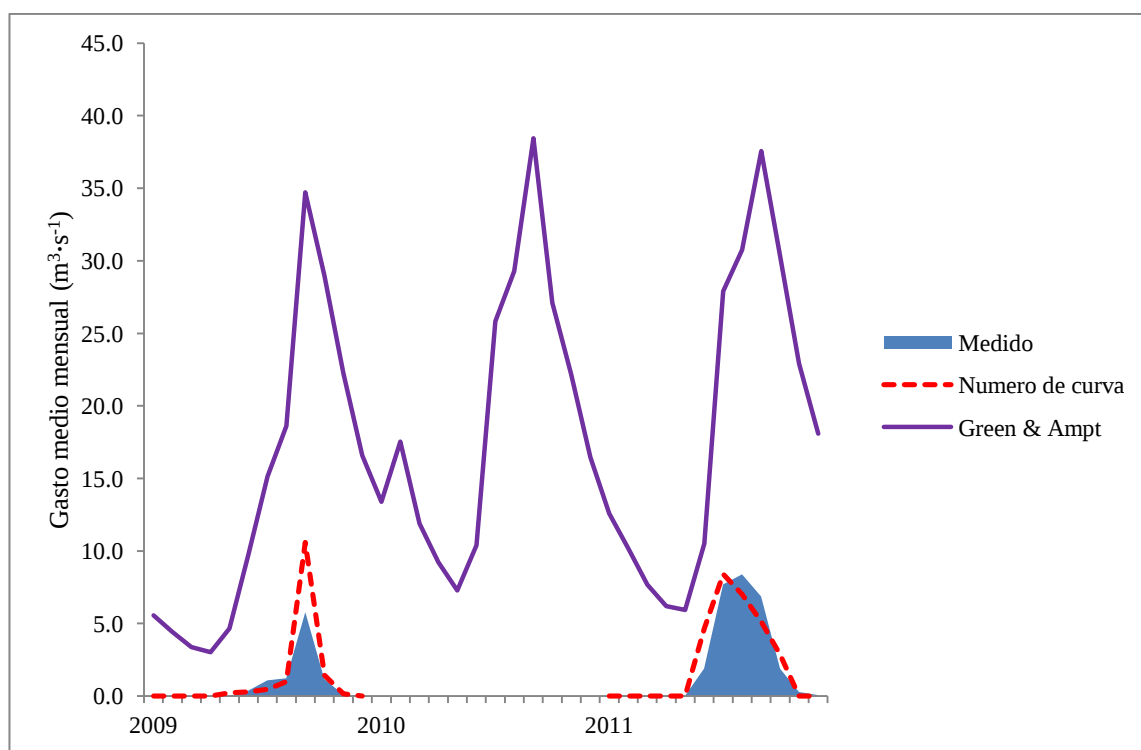


Figura 70. Dinámica del gasto medio medido y simulado por el modelo SWAT a nivel mensual de 2009 a 2011 número de curva vs Green & Ampt.

Al aplicar la metodología de Green & Ampt para los años antes mencionados, se observa que el modelo sobreestima de manera abrupta el gasto medio mensual, y hasta el

momento, con los datos ingresados al programa, **no tiene la capacidad suficiente para la predicción** de escurrimientos en comparación del método de número de curva.

El método de Green & Ampt dentro del modelo SWAT depende en gran medida de los valores de conductividad hidráulica, textura, contenido de humedad y los valores de número de curva acordes a cada uso del suelo y vegetación y condiciones hidrológicas.

Polo *et al.*, (2003) mencionan que la conductividad hidráulica de los suelos, constituye quizás el parámetro físico de un suelo más determinante a la hora de cuantificar las diferentes componentes del balance global de agua en la superficie del mismo.

En el presente estudio, los valores de la conductividad hidráulica y textura se ingresaron como datos estimados y obtenidos a partir de 8 sitios de muestreo de suelo, lo cual origina una incertidumbre referida a los valores de los mismos y representación en la cuenca; esto debido a la variabilidad espacial intrínseca de un medio complejo como es el suelo, añadiendo a la incertidumbre las diferencias en el uso del suelo y la vegetación, paso de maquinaria agrícola que infiera en el proceso de compactación de los suelos, aplicación de químicos agrícolas, cobertura vegetal, etc.

5.5. Periodo de simulación de sedimentos 1976 a 1985

Para el análisis de sedimentos se utilizó el periodo de simulación 1976 a 1985 con cuatro años de "fase de calentamiento", siendo los años evaluados de 1980 a 1985 con información de la base de datos del BANDAS, el cual reporta el volumen de sedimentos en miles de m^3 , al manipularse estos valores por el peso específico propuesto del sedimento de $1.7 \text{ ton} \cdot m^{-3}$ y tomando en cuenta el área de la cuenca en ha, se obtuvo la producción de sedimento mensual y anual en $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$.

5.5.1. Simulación mensual 1976 a 1985

Para esta serie se realizó pruebas de modificación del parámetro USLE_K y USLE_C en un 10 % partiendo de los valores ingresados, factores que forman parte de la MUSLE, sin influir significativamente en la producción de sedimentos.

En la Figura 71 se representa la dinámica y la magnitud de los sedimentos mensuales con el método de número de curva para escurrimientos y la metodología MUSLE para sedimentos, comparando en el Cuadro 70 los registros medidos y simulados para los años evaluados de 1980 a 1985.

Se observa que el modelo tiende a subestimar la cantidad de sedimentos, especialmente durante la temporada de lluvias.

Al efectuar la simulación mensual se obtuvo un **NSE de 0.43** y un **R² de 0.15**, siendo considerado el modelo “**Insatisfactorio**” según la clasificación de Moriasi *et al.*, (2007).

Cuadro 70. Producción de sedimentos (ton·ha⁻¹) medidos y simulados a nivel mensual de 1980 a 1985.

Año	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	Medido (ton·ha ⁻¹)	3.681	0.000	0.000	0.000	0.185	0.339	0.236	1.040	0.160	0.006	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.001	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000
1981	Medido (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.286	1.384	0.441	0.047	0.000	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.029	0.058	0.033	0.003	0.000	0.000
1982	Medido (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.013	0.029	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000
1983	Medido (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.225	1.263	0.051	0.534	0.000	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.011	0.003	0.033	0.000	0.000	0.000
1984	Medido (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.220	0.407	0.074	1.351	0.120	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008	0.060	0.001	0.000	0.000
1985	Medido (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.243	0.207	0.059	0.111	0.007	0.000	0.000
	Simulado (ton·ha ⁻¹)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.006	0.002	0.009	0.000	0.000	0.000

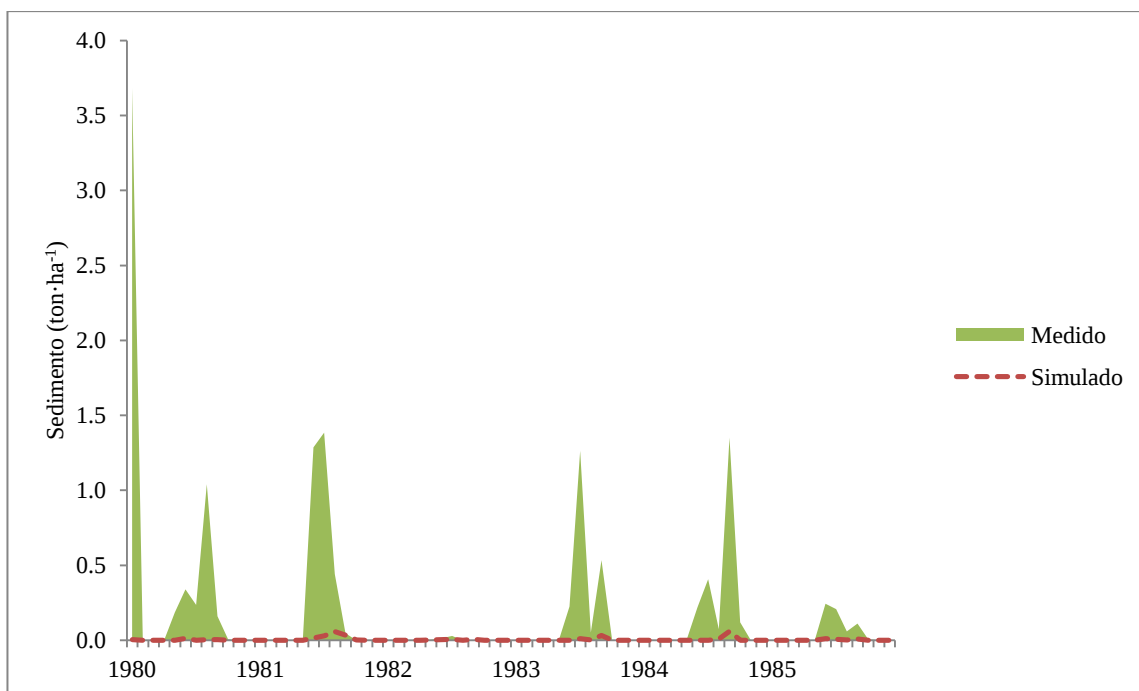


Figura 71. Dinámica de la producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.

Cabe mencionar que el transporte de los sedimentos en el cauce fue determinado con la versión simplificada de Bagnold (1977), la cual es utilizada para determinar la degradación del cauce y transporte de sedimentos como una función de la pendiente del canal y la velocidad de la corriente, por tal motivo, la subestimación de la cantidad de sedimentos simulados podría estar influenciada por las descargas de aguas residuales a la corriente principal y aspectos relacionados a la cobertura vegetal, parámetros en los cuales se necesita una mayor cantidad de información.

En futuras investigaciones podría considerarse el empleo de los métodos de cálculo para el transporte de sedimentos con bases físicas y de propiedades del sedimento, siendo indispensable el contar con información de calidad y cantidad acerca de las características de los mismos, contar con datos de la descarga de aguas residuales a la corriente principal y su concentración de partículas, al igual que refinar la información

correspondiente al uso de suelo y la vegetación y los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). Adicionalmente se efectuó el análisis de regresión mostrado en la Figura 72 donde S_s son los sedimentos simulados y S_m son los sedimentos medidos, que indica una pequeña relación directa entre ellos.

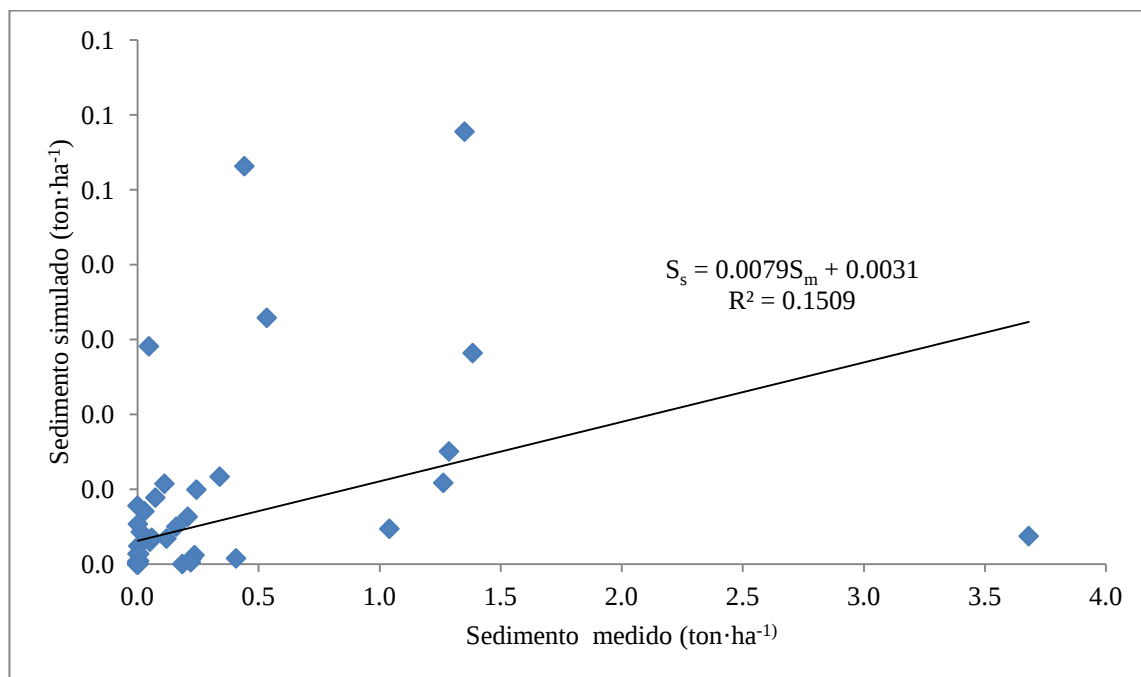


Figura 72. Comparación entre la cantidad de sedimento medido y estimado por el modelo SWAT a nivel mensual de 1980 a 1985.

5.5.2. Simulación anual 1976 a 1985

En la Figura 73 se representa la dinámica y la magnitud de los sedimentos anuales durante el periodo de simulación de 1976 a 1985 con el método de número de curva para escurrimientos y MUSLE en sedimentos, asignando los primeros cuatro años como “fase de calentamiento”, siendo evaluados los años 1980 a 1985. Para evaluar esta serie, en el Cuadro 71 se reportan los sedimentos medidos (ton ha^{-1}) en la estación Ticumán y los simulados por el modelo SWAT a nivel anual, mientras que en la Figura 74 se representa el análisis de regresión.

Cuadro 71. Producción de sedimentos ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) medidos y simulados a nivel anual de 1980 a 1985.

Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Medido ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$)	1.966	3.159	0.047	2.073	2.178	0.630
Simulado ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$)	0.027	0.140	0.021	0.047	0.070	0.028

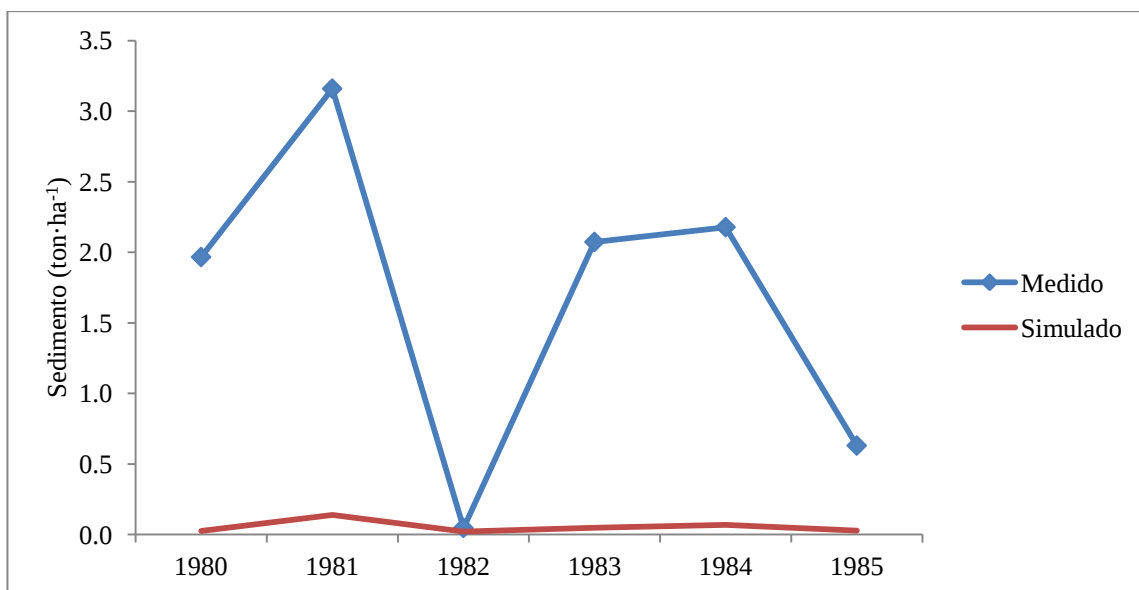


Figura 73. Dinámica de la producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.

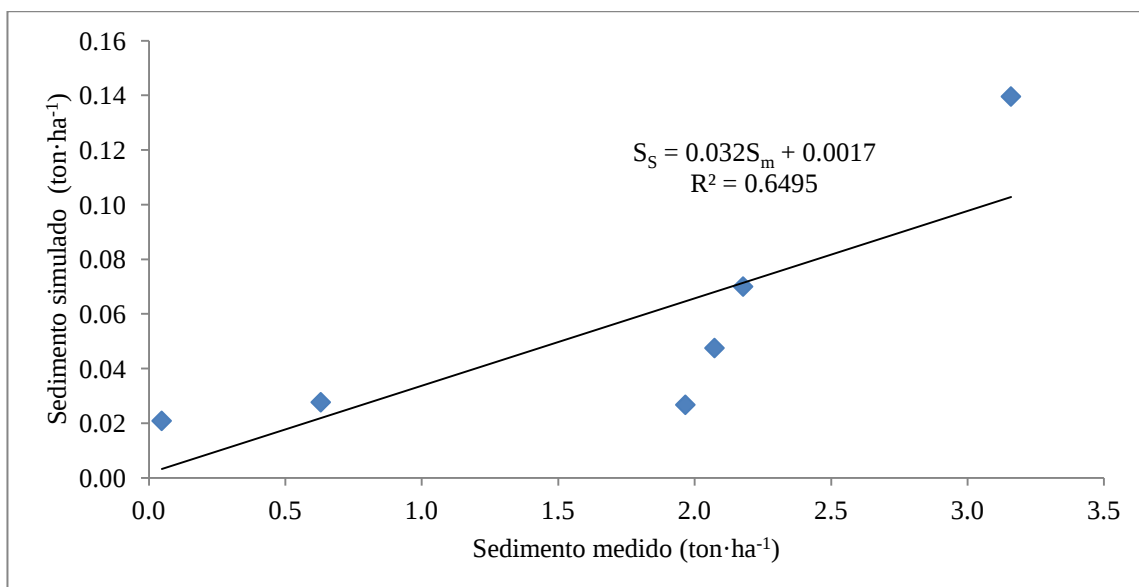


Figura 74. Comparación entre la cantidad de sedimento medido y estimado por el modelo SWAT a nivel anual de 1980 a 1985.

Al realizar la estimación anual de la cantidad de sedimentos en $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ se obtuvo un **NSE de -2.38** y un **R^2 de 0.65**, índices que resultan menores con su comparación mensual, esto probablemente originado por el número escaso de datos medidos a nivel anual para su comparación.

El resultado del NSE indica que el modelo con la información disponible hasta el momento, **no tiene la capacidad suficiente para la predicción** de los sedimentos a nivel anual, lo cual indica que la media de valores observados de sedimentos son mejores predictores que los valores simulados.

6. CONCLUSIONES

En términos de la producción de escurrimientos para los periodos 1976 a 1985 y 2002 a 2011, el modelo fue calibrado y validado satisfactoriamente a nivel mensual para la cuenca del río Yautepec, por lo cual su aplicación a nivel de subcuencas dentro de dicha cuenca, es altamente recomendable.

La dinámica y magnitud de la producción de escurrimientos a nivel mensual fue estimada con el modelo SWAT de forma aceptable, obteniéndose para la etapa de calibración de 2002 a 2009 un **NSE de 0.79** y **R² de 0.81**, clasificándose como un **"Muy buen modelo"**.

A nivel anual, la etapa de simulación de 2002 a 2009 en la estimación de escurrimientos, presentó un **NSE de 0.48** y **R² de 0.59**, por lo que el modelo es considerado **"Insatisfactorio"**.

Para la estimación de escurrimientos a nivel mensual del periodo de 1976 a 1985, se ingresó los parámetros calibrados de la serie calibrada de 2002 a 2009, obteniéndose un **NSE de 0.71** y **R² de 0.72** clasificándolo como un **"Buen modelo"**.

La validación del modelo para el año 2011 generó un **NSE de 0.89** con un **R² de 0.89**, siendo considerado dentro de la clasificación de Moriasi *et al.*, (2007) como un **"Muy buen modelo"**.

Para los escurrimientos en el periodo 1976 a 1985 a nivel anual se obtuvo un **NSE de 0.57** y un **R² de 0.75**, considerando el modelo como **"Satisfactorio"**.

La dinámica y magnitud de la producción de sedimentos a nivel mensual fue estimada con el modelo SWAT obteniéndose para el periodo 1976 a 1985 un **NSE de 0.43** y **R² de 0.15**, clasificándose el modelo como "**Insatisfactorio**", siendo subestimada de manera abrupta la producción de sedimentos.

El modelo con la información disponible hasta el momento **no tiene la suficiente capacidad predictiva** para la estimación de sedimentos a nivel anual.

Se compararon a nivel mensual los escurrimientos generados con el método default de Green & Ampt vs los escurrimientos generados por el método de número de curva, para el periodo 2008 a 2011, encontrando **que la capacidad predictiva de Green & Ampt es insuficiente con los datos ingresados en el modelo**, pues sobreestimó de manera excesiva los gastos medios mensuales.

Al necesitar SWAT una gran cantidad de datos de entrada (clima, uso del suelo y vegetación, topografía, suelos, acuíferos, cuerpos de agua, uso del agua, transporte de agua y sedimentos, etc.) es indispensable que existan éstos en cantidad y calidad, para obtener buenos resultados en los procesos de simulación.

La aplicación en México del SWAT sigue siendo limitada, debido en gran medida a la elevada demanda de datos de entrada, situación que en el país es frecuente por la ausencia y/o calidad de los mismos. Por tal motivo, es necesario realizar mayor cantidad de estudios a nivel cuenca de las variables de ingreso al SWAT y así obtener mayor información y confiabilidad con la modelación.

7. RECOMENDACIONES

El modelo SWAT es altamente recomendable para la modelación de escurrimientos a nivel mensual, pudiendo constituirse en una herramienta de gran utilidad en los procesos de planeación y gestión de los recursos naturales por parte de los tomadores de decisiones a nivel local, municipal, estatal y federal.

Se recomienda investigar acerca de las variables relacionadas con la producción de sedimentos en la cuenca y su tránsito a través del cauce principal y canales secundarios (descargas de aguas residuales, propiedades físicas del sedimento y características del cauce y aspectos del uso del suelo y vegetación), para lograr que el modelo estime de manera confiable la cantidad y calidad de los sedimentos en la cuenca.

El método de número de curva a comparación del método de Green & Ampt para esta investigación generó mejores resultados en el proceso de simulación de los escurrimientos durante los años 2009 a 2011, no significando sea un método inferior a número de curva, sino que es necesario contar con mayor información de los parámetros físicos del suelo (especialmente la conductividad hidráulica y la textura del suelo), uso del suelo y vegetación y la mejora en la representación espacial de las variables SWAT.

A las instituciones gubernamentales responsables de la medición de las variables meteorológicas e hidrométricas se les exhorta a continuar con dichas actividades, e implementar programas de medición de las variables que requiere la modelación con SWAT, siendo uno de los fines principales generar e incrementar los periodos de simulación y poseer una mayor certeza en las predicciones a nivel mensual y anual.

8. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & Van Genuchten, M. T. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2), 413-430.
- Abbaspour, K. C. 2012. SWAT-CUP 2015: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual EAWAG: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Zurich, Switzerland. 103 pp.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Aparicio, M. F. 2001. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México. LIMUSA.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1), 47-69.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121 (2):171-183.

- Arnold, J. G., & Allen, P. M. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 176(1), 57-77.
- ASCE. 1993. The ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management committee Irrigation and Drainage Division, Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irri. Drain. Engng*, ASCE, 119(3), 429-442.
- Bagnold, R. A. 1977. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Res.* 13(2):303-312.
- Barrios, A. G., & Urribarri, L. A. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 11-29.
- Becht, G. 1974. Systems theory, the key to holism and reductionism. *Bioscience*, 24 (10), 569-579.
- Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into nonuniform soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE 95(IR4), 451-462.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Campos, A. D. F. 1998. *Procesos del ciclo hidrológico*. Ed. Universitaria Potosina. San Luis Potosí, S.L.P., México. 76 pp.
- Campos, A. D. F. 2007. *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. 440 pp.
- CEAMA. 2005. *Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos. Estudio de Aprovechamiento Hidráulico Integral y de Control de Inundaciones*

- en el río Yautepec (Municipios de Yautepec, Tlaltizapan, Tlaquiltenango y Jojutla) en Morelos. México.
- Chen, C. L. 1983. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603-1621.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. New York. 570 pp.
- CNA. 1992. Comisión Nacional del Agua. Características de los distritos de riego año agrícola 1990. México. D.F. 809 pp.
- CONAGUA. 2010. Comisión Nacional del Agua. Programa hídrico visión 2030 del estado de Morelos. México. 172 pp.
- CONAGUA. 2015a. Comisión Nacional de AGUA. Banco Nacional de Datos de aguas superficiales, BANDAS. Sitio web:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm> (Consulta noviembre 2015).
- CONAGUA. 2015b. Comisión Nacional del Agua. Actualización de la disponibilidad medial anual de agua en el acuífero Cuautla - Yautepec (1702), Estado de Morelos. 31 pp.
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. 1966. Digital simulation in hydrology, Stanford watershed model IV. Dep. Civ. Eng. Stanford Univ. Stanford, Calif. Tech. Rep. No. 39.
- Dawdy, D. R. 1969. Considerations involved in evaluation mathematical modeling of urban hydrologic systems. U.S. Geol. Surv., Water Supply Pap. No. 1591-D.
- Dingman, S. L. 1994. *Physical hydrology*. Prentice Hall. Inc. Englewood Cliffs. NJ. 262 pp.

- Diskin, M. H. 1970. Definition and uses of the linear regression model. *Water Resour. Res.* 6(6): 1668-1673.
- Diskin, M. H., Buras, N., & Zamir, S. 1973. Application of a simple hydrologic model for rainfall-runoff relations of the Dalton watershed. *Water Resour. Res.* 9(4):927-936.
- DOF. 2014. Diario Oficial de la Federación. 11 de septiembre del 2014. Ley de Aguas Nacionales. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México.
- DOF. 2015. Diario Oficial de la Federación. 27 de marzo del 2015. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México.
- Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. 2005. Automatic model calibration. *Hydrological Processes*, 19(3), 651-658.
- ESRI. 2013. Software ArcGIS 10.1. Redlands, CA. USA.
- FAO. 1978. Food and Agriculture Organization. Agroecological Zones Project. Vol. I Methodology and results for Africa. Rome.
- FAO. 1981. Food and Agriculture Organization. Agroecological Zones Project. Vol. III. Methodology and results for México, Central and South America. Rome. 143 pp.
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. 2012. Projections of 21st Century Sierra Nevada Local Hydrologic Flow Components Using an Ensemble of General Circulation Models. *Journal American Water Resources Association*. 48:1104-1124.
- Figueroa, S. B., Amante, O. A., Cortés, H. G., Pimentel, J., Osuna, E. S., Rodríguez, J. M., & Morales, F. F. J. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. CP-SARH. México. 150 pp.

- Francisco, N. N. 2005. Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, México. 122 pp.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema climático de Köppen adaptado para México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México. 98 pp.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Green, W. H., & Ampt, G. A. 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01), 1-24.
- Hargreaves, G. H. 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980-984.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hershfield, D. M. 1961. Rainfall frequency atlas of the U.S. for duration from 30' to 24 h and return periods from 1-100 years. U.S. Weather Bureau. Technical paper No. 40. Washington, DC, USA.
- Horton, J. H., & Newsom, D. W. 1953. A rapid gas evolution method for calcium carbonate equivalent in liming materials. *Soil Science Society of America Journal*, 17(4), 414-415.

- Ibáñez, C. L. A., & Ledesma, R. R. 2005. Relaciones Intensidad - Duración - Frecuencia de la precipitación en el estado de Guanajuato. VIII Seminario y Reunión de Ingeniería Hidroagrícola. Universidad Autónoma Chapingo.
- IBSNAT. 1985. IBSNAT Progress Report (1 September 1982 to 31 July 1985). Department of Agronomy and Soil Science College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Manoa Honolulu, Hawaii. 48 pp.
- IMTA. 2006. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Extractor Rápido de Información Climática (ERIC 3.0). Jiutepec, Morelos.
- INEGI. 1981. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censo de Población y Vivienda 1980. México.
- INEGI. 1983a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica E14-2. Escala 1:250,000. México.
- INEGI. 1983b. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica E14-5. Escala 1:250,000. México.
- INEGI. 1984a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación E14-2. Escala 1:250,000. Serie I. México.
- INEGI. 1984b. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación E14-5. Escala 1:250,000. Serie I. México.
- INEGI. 2001a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. Subprovincias fisiográficas. México.

- INEGI. 2001b. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Diccionario de datos edafológicos (Alfanumérico). Escala 1: 250,000. México.
- INEGI. 2002. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales geológicos. Continuo nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. México.
- INEGI. 2006. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. División Municipal de México 2005. Obtenido del Marco Geoestadístico Municipal, II Censo de Población y Vivienda 2005. Versión 1.0 México.
- INEGI. 2008. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales climáticos. Continuo nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. México.
- INEGI. 2010a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Continuo nacional. Escala 1:250,000. Serie IV. México.
- INEGI. 2010b. Localidades del República Mexicana, escala 1:1. Obtenido de los principales resultados por localidad. Censo de Población y Vivienda 2010. México, D.F.
- INEGI. 2010c. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. División Municipal de México 2005. Obtenido del Marco Geoestadístico Municipal, II Censo de Población y Vivienda 2005. Versión 1.0 México.
- INEGI. 2011. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censo de Población y Vivienda 2010. México.

- INEGI. 2012. Continental-Continuo de Elevaciones Mexicano, CEM, 30 m, Versión 3.0.<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. (Consulta: agosto 2015).
- Krause, P., Boyle, D. P., & Båse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Kodoatie, R. J. 2000. Sediment transport relations in alluvial channels. Thesis (Ph. D.). Colorado State University. 285 pp.
- Lane, L. J. 1983. SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 19: Transmission Losses. USDA, SCS, Washington, DC.
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.
- Linsley, R. K. K., Paulhus, M. A., Serra, J. L. F., & Miguel, D. A. 1967. Hidrología para ingenieros. McGraw-Hill. New. York. 350 pp.
- Ma, L., Ascough II, J. C., Ahuja, L. R., Shaffer, M. J., Hanson, J. D., & Rojas, K. W. 2000. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. *Transactions of the ASAE*, 43(4), 883- 895.
- Martínez, M. M. R., López, M. R., Hernández, F. E. 2001. Relación sedimentos-erosión en la cuenca alta del Papaloapan. XI Congreso Nacional de Irrigación, ANEI, A.C. Guanajuato, Guanajuato, México.
- Mays, L. W. 2005. *Water Resources Engineering*. John Wiley & Sons. Hoboken, N. J. 928 pp.
- McCuen, R. H. 2005. *Hydrologic analysis and design*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ. USA. 439 pp.

- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 21: 239-245.
- Mein, R. G., & Larson, C. L. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9(2), 384-394.
- Molinas, A., & Wu, B. 2001. Transport of sediment in large sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic research*. 39:135-146.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and the environment. pp. 205 - 234. In *The state and movement of water in living organisms*, XIXth Symposium. Soc. for Exp. Biol., Swansea. Cambridge University Press.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Munsell Color. 1990. Munsell soil color chart. Baltimore.
- Muñoz, O. A. R. 1997. Empleo del modelo EPIC para determinar el efecto de la labranza de conservación sobre el cultivo de trigo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad en Edafología. Montecillos, México. 119 pp.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3), 282-290.
- Nearing, M. A., Liu, B. Y., Risse, L. M., & Zhang, X. 1996. Curve number and Green - Ampt effective hydraulic conductivities. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 32(1), 125-136.

- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. 2011. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. 618 pp.
- NRCS. 1996. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. U.S Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. Government Printing Office, Washington, D. C.
- Palacios, V. O. L. 1986. El uso de modelos en irrigación y áreas afines. Terra, 4, 41-49.
- Pérez, N. S. 2013. Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. 356 pp.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. 1982. A precise method for determining contoured surfaces. Australian Petroleum Exploration Association Journal, 22(1), 205-212.
- Polo, M. J., Lafuente, P., & Giráldez, J. V. 2003. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de olivar y su influencia en el balance hidrológico global. Estudios de la zona no saturada del suelo, 6, 209-213.
- Post, D. F., Fimbres, A., Matthias, A. D., Sano, E. E., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. 2000. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. Soil Science Society of America Journal, 64(3), 1027-1034.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100:81-92.
- Rallison, R. E., & Miller, N. 1982. Past, present, and future SCS runoff procedure. In: Rainfall-runoff relationship/proceedings, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi, USA/edited by VP Singh. Littleton, Colo.: Water Resources Publications.

- Ramírez, C. H. 2014. Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del pacífico sur. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. 233 pp.
- Rawls, W. J., & Brakensiek, D. L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In Watershed Management in the Eighties (p. 293-299). ASCE. New York, N. Y.
- Reich, B. M. 1963. Short-duration rainfall-intensity estimates and other design aids for regions of sparse data. *Journal of Hydrology*, 1(1), 3-28.
- Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204-1213.
- Rivera, T. F., Pérez, N. S., Ibáñez, C. L. A., & Hernández, S. F. R. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia* 46:101-105.
- Rodríguez, S. R. C. 2015. Plan de gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Yautepec. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 114 pp.
- Romo, G. J. R., & Arteaga, R. R. 1989. *Meteorología Agrícola*. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo, México. 442 pp.
- SAGARPA. 2011. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Lineamientos operativos específicos para la aplicación de recursos del componente conservación y uso sustentable de suelo y agua (COUSSA). México.

- Salas, M. R. 2013. Modelado hidrológico de la cuenca del río Mixteco en el estado de Oaxaca. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. 139 pp.
- Salas, M. R., Ibáñez, C. L. A., Arteaga, R. R., Martínez, M. M. R., & Fernández, R. D. S. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco. *Agrociencia* 48(1):1-15.
- Salgado, R. J. H., & Guitrón, A. 2012. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, México.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
- SCS. 1972. Soil Conservation Service. Section 4 Hydrology. National Engineering Handbook. USA.
- Shen, Z. Y., Gong, Y. W., Li, Y. H., Hong, Q., Xu, L., & Liu, R. M. 2009. A comparison of WEP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1435-1442.
- Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendiente: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical*. 54(3):275-291.
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. 2005. Watershed Models. CRC Press. USA. 512 p.
- Smith, L., & Weathcraft, S. J. 1993. Groundwater Flow. In. Maidment, D. R. Handbook of Hydrology. McGraw Hill.
- SMN. 2016. Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.conagua.gob.mx/climatología/> (Consulta: febrero de 2016).

- Stehr, A., Debels, P., Romero, F., & Alcayaga, H. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588-601.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. 2005. *Ciencias de la Tierra*. Ed. Pearson Educación. Madrid. 736 pp.
- Tinajero, G. J. A. 1982. Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. *Geohidrología*. Editorial SARH. México. 232 pp.
- Torres, B. E., Mejía, S. E., Cortes, B. J., Palacios, V. E., & Exebio, G. A. 2005. Adaptación de un modelo hidrológico a la cuenca del Rio Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39(1):481-490.
- USDA-ARS. 2015. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service and Texas A&M AgriLife Research. <http://swat.tamu.edu>. (Consulta: septiembre 2015).
- U.S. EPA. 2002. Environmental Protection Agency of United States of America. Guidance for quality assurance project plans for modeling. EPA QA/G-5M. Report EPA/R-02/007. Washington, D. C.: U.S. EPA, Office of Environmental Information.
- Van Liew, M. W., & Garbrecht, J. 2003. Hydrologic simulation of the Little Washita river experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Resources Association* 39(2):413-426.
- Vargas, R. R., Arias, J. A. C., Straaten, P. V., Lavelle, P., Zonn, S. V., Ibish, P. L., & Kononova, M. M. 2009. Guía para la descripción de suelos (No. FAO 631.44 G943 2009). FAO, Roma, Italia.

- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils-Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63(4), 251-264.
- Watson, D. F., & Philip, G. M. 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-processing*, 2(4), 315-327.
- Williams, J. R. 1975. Sediment routing for agricultural watershed. *Water Resour. Bull.* 11(5):965-974.
- Williams, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12(1):100-103.
- Williams, J. R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basin. *Water Resour. Bull.* 16(5):843-848.
- Williams, J. R. 1992. WXPARM: Weather parameter calculator for EPIC. User Manual. US Department of Agriculture. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Texas.
- Williams, J. R. 1995. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972. ARS-S-40. 224-252 pp.*
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook* 282. USDA-ARS.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* 282. USDA-ARS.

- Yang, C. T. 1996. Sediment Transport Theory and Practice. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Yang, J., Abbaspour, K. C., Reichert, P., & Yang, H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358: 1–23.
- Zuñiga, T. A. E. 2009. Análisis del riego por inundaciones como consecuencia del desbordamiento del río Yautepec, Morelos. México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM. 92 pp.

9. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de laboratorio de parámetros físicos de las muestras de suelo.

Sitio	Tipo de suelo	Capa	Materia orgánica (%)	Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Conductividad hidráulica ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	Grupo hidrológico
S1	Fluvisol	1	0.27	1.54	127.33	A
		2	0.27	1.55	126.00	
		3	0.13	1.55	151.59	
S2	Regosol	1	1.34	1.54	45.60	A
		2	0.81	1.55	77.77	
		3	0.13	1.59	88.33	
S3	Litosol	1	1.48	1.52	58.49	A
		2	1.34	1.52	70.40	
S4	Andosol	1	0.13	1.63	36.88	A
		2	0.13	1.63	37.63	
		3	0.13	1.63	39.84	
S5	Cambisol	1	1.21	1.56	15.83	B
		2	1.08	1.57	15.61	
		3	0.67	1.45	1.45	
S6	Vertisol	1	1.88	1.41	3.27	D
		2	0.13	1.6	6.89	
S7	Feozem	1	3.77	1.39	6.46	C
		2	2.55	1.41	2.11	
S8	Rendzina	1	7.66	1.12	41.9	A
		2	1.21	1.51	5.96	

Anexo 2. Resultados de laboratorio relacionados a la textura de las muestras de suelo.

Sitio	Capa	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
S1	1	86.4	11.3	2.4	Sand (Arena)
	2	84.4	13.2	2.4	Loamy Sand (Arena arcillosa)
	3	86.4	11.3	2.4	Sand (Arena)
S2	1	70.4	19.3	10.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	2	70.4	25.3	4.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	3	76.4	19.3	4.4	Loamy Sand (Arena arcillosa)
S3	1	62.4	31.3	6.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	2	66.4	29.3	4.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
S4	1	60.4	31.3	8.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	2	60.4	31.3	8.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	3	60.4	31.3	8.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
S5	1	60.4	19.3	20.4	Sandy Clay Loam (Franco arcillo arenoso)
	2	60.4	19.3	20.4	Sandy Clay Loam (Franco Arcillo arenoso)
	3	34.4	25.3	40.4	Clay (Arcilla)
S6	1	30.4	33.3	36.4	Clay Loam (Franco arcilloso)
	2	52.4	23.3	24.4	Sandy Clay Loam (Franco arcillo arenoso)
S7	1	44.4	23.3	32.4	Clay Loam (Franco arcilloso)
	2	38.4	21.3	40.4	Clay (Arcilla)
S8	1	58.4	25.3	16.4	Sandy Loam (Franco arenoso)
	2	40.4	35.3	24.4	Loam (Franco)

Anexo 3. Resultados de laboratorio relacionada al agua disponible y color del suelo húmedo.

Sitio	Capa	Espesor (cm)	AWC ³ (mm·mm ⁻¹)	Color del suelo (húmedo)
S1	1	20.0	0.013	10YR2/2
	2	25.0	0.015	10YR2/2
	3	39.0	0.026	10YR3/2
S2	1	25.0	0.033	10YR2/2
	2	23.0	0.022	10YR2/2
	3	25.0	0.038	10YR3/3
S3	1	30.0	0.042	10YR3/3
	2	19.0	0.026	10YR3/3
S4	1	30.0	0.032	10YR3/4
	2	24.0	0.039	10YR4/6
	3	56.0	0.104	10YR3/6
S5	1	20.0	0.017	10YR2/2
	2	18.0	0.021	10YR3/2
	3	20.0	0.033	10YR3/1
S6	1	30.0	0.035	10YR2/1
	2	10.0	0.016	10YR3/4
S7	1	26.0	0.022	10YR2/1
	2	19.0	0.031	7.5YR2.5/1
S8	1	3.0	0.003	7.5YR5/4
	2	22.0	0.051	10YR6/4

¹Capacidad de campo; ²Punto de marchitez permanente; ³Agua disponible en la capa de suelo.

Anexo 4. Resultados de laboratorio del suelo relacionados al albedo, carbonatos, % roca, etc.

Sitio	Capa	Roca (% peso)	Albedo	CaCO₃ equivalente (%)	USLE K
S1	1	20.00	0.024	--	0.196
	2	16.90	0.024	--	0.207
	3	10.20	0.093	--	0.196
S2	1	5.86	0.024	--	0.148
	2	4.20	0.024	--	0.221
	3	3.30	0.093	--	0.198
S3	1	2.00	0.093	1.08	0.214
	2	8.70	0.093	1.19	0.235
S4	1	5.40	0.093	--	0.194
	2	5.50	0.162	--	0.194
	3	0.40	0.093	--	0.194
S5	1	0.53	0.024	--	0.134
	2	1.50	0.093	--	0.134
	3	2.00	0.093	--	0.155
S6	1	2.30	0.024	--	0.165
	2	11.90	0.093	--	0.142
S7	1	1.48	0.024	--	0.146
	2	1.50	0.059	--	0.147
S8	1	31.40	0.231	61.26	0.149
	2	29.30	0.300	66.23	0.163

Anexo 5. Datos climáticos del periodo 1976 a 1988 ingresados al SWAT.

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS
15103	19.08	-98.74	2620.00	13
17001	18.93	-98.90	1631.00	13
15039	19.09	-98.88	2543.00	13
17018	18.76	-99.12	970.00	13
17024	18.87	-99.08	1231.00	13
17039	19.04	-99.09	2836.00	13
17005	18.81	-98.95	1302.00	13
17012	18.91	-98.97	1380.00	13

STATION	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12
15103	18.68	19.99	22.53	23.72	23.26	20.56	19.33	19.64	18.94	19.76	19.48	19.01
17001	28.26	28.47	29.61	30.11	29.92	29.12	28.60	29.14	28.57	28.81	28.58	28.16
15039	18.69	19.55	21.56	23.03	23.36	21.18	20.43	20.47	20.23	20.24	20.02	18.17
17018	209.42	31.77	34.44	36.18	35.57	32.50	30.70	30.90	30.42	30.80	30.72	30.59
17024	28.48	30.36	32.36	33.62	32.65	30.00	28.62	28.69	28.08	28.67	28.74	28.80
17039	19.92	21.22	23.83	24.80	23.79	20.78	19.81	19.90	19.48	20.01	20.27	20.14
17005	27.35	28.62	31.13	32.47	32.12	29.50	28.04	28.16	27.69	28.10	28.10	27.96
17012	27.10	28.23	30.48	31.96	31.74	29.70	28.72	28.59	27.95	28.25	27.91	27.56

STATION	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12
15103	3.87	4.73	6.41	7.73	8.82	9.14	8.35	8.24	8.27	6.70	5.46	4.71
17001	9.96	10.16	11.36	12.43	13.29	12.78	12.30	12.55	12.34	11.73	11.01	9.96
15039	4.11	5.11	6.23	8.28	9.51	9.76	9.48	9.27	9.47	7.99	6.25	5.26
17018	9.08	10.32	12.56	15.76	17.96	19.13	18.01	17.77	17.87	15.70	12.07	10.43
17024	7.29	8.49	10.09	12.69	15.24	16.33	15.72	15.48	15.52	13.30	9.89	8.54
17039	7.27	7.86	8.91	10.81	11.71	11.97	11.05	10.90	10.91	10.32	9.04	8.28
17005	9.42	10.72	12.24	14.63	16.37	17.39	16.27	16.16	16.17	14.62	12.11	10.77
17012	11.68	12.67	14.34	16.44	17.18	17.01	16.04	15.83	16.01	14.94	13.48	12.74

STATION	TMPSTD MX1	TMPSTD X2	TMPSTD X3	TMPSTD X4	TMPSTD X5	TMPSTD X6	TMPSTD X7	TMPSTD X8	TMPSTD X9	TMPSTD MX 10	TMPSTD MX 11	TMPSTD MX 12
15103	2.40	2.21	2.71	2.35	2.75	2.60	2.01	1.94	2.31	2.05	2.21	2.20
17001	1.70	1.24	1.30	1.57	1.65	1.53	1.70	1.53	1.80	1.80	1.70	1.44
15039	2.92	3.06	3.51	3.50	2.82	2.94	2.38	1.89	2.23	2.12	2.65	2.55
17018	3.59	2.10	2.08	1.85	2.12	2.57	1.60	1.53	1.75	1.66	1.80	1.57
17024	2.17	2.26	2.16	2.06	3.26	2.60	1.71	1.60	1.64	1.66	1.79	1.53
17039	2.34	2.36	2.52	2.82	3.02	2.74	1.73	1.62	1.81	1.94	1.91	1.61
17005	2.15	2.27	2.39	1.96	2.30	2.55	1.62	1.65	1.94	1.56	1.67	1.48
17012	2.09	2.04	1.93	1.77	2.08	2.17	1.84	1.60	1.68	1.50	2.01	1.57

STATION	TMPSTD MN1	TMPSTD N2	TMPSTD N3	TMPSTD N4	TMPSTD N5	TMPSTD N6	TMPSTD N7	TMPSTD N8	TMPSTD N9	TMPSTD MN 10	TMPSTD MN 11	TMPSTD MN 12
15103	2.16	2.09	2.31	1.76	1.50	1.66	1.47	1.47	1.59	1.97	1.93	2.01
17001	1.99	1.67	2.44	2.33	1.25	2.06	2.31	2.03	2.06	2.31	1.99	1.98
15039	2.48	2.25	2.44	2.24	1.96	1.88	1.34	1.26	1.52	1.93	2.02	2.32
17018	2.39	2.63	2.61	2.09	1.94	1.40	1.41	1.32	1.50	2.20	2.43	2.50
17024	2.34	2.18	2.37	2.10	2.22	2.27	1.72	1.71	1.82	2.42	2.39	2.30
17039	1.91	1.92	2.54	1.77	1.63	1.10	1.09	1.22	1.29	1.61	1.72	1.90
17005	1.88	1.84	2.17	2.00	1.83	1.36	1.44	1.31	1.44	1.79	2.06	2.05
17012	1.94	2.07	2.58	1.89	1.94	1.50	1.26	1.17	1.25	1.87	1.74	1.90

STATION	PCPMM1	PCPMM2	PCPMM3	PCPMM4	PCPMM5	PCPMM6	PCPMM7	PCPMM8	PCPMM9	PCPMM10	PCPMM11	PCPMM12
15103	20.76	14.08	14.98	39.55	85.44	166.91	159.77	136.32	141.34	54.75	18.32	6.73
17001	4.73	4.33	3.13	6.70	47.08	149.95	161.34	120.78	132.01	44.54	30.75	2.58
15039	22.15	17.07	12.85	29.08	64.63	128.32	148.78	145.37	112.93	56.54	16.78	6.73
17018	11.65	5.12	4.62	7.78	69.11	195.20	186.23	173.93	164.03	65.03	10.63	3.33
17024	10.80	3.07	4.64	10.56	67.01	194.38	180.26	171.14	195.10	64.73	12.95	2.98
17039	22.40	12.28	9.76	35.91	94.23	296.23	350.67	332.15	252.95	106.77	26.24	6.45
17005	11.60	4.03	4.21	10.28	49.28	195.32	181.68	141.26	173.03	61.08	15.15	2.51
17012	12.15	3.52	5.77	13.10	63.08	191.83	198.08	163.79	185.68	49.98	15.43	4.49

STATION	PCPSTD1	PCPSTD2	PCPSTD3	PCPSTD4	PCPSTD5	PCPSTD6	PCPSTD7	PCPSTD8	PCPSTD9	PCPSTD10	PCPSTD11	PCPSTD12
15103	4.74	2.37	2.34	4.12	5.50	7.94	10.04	7.25	7.53	4.32	2.58	1.32
17001	1.78	1.58	1.17	1.26	4.34	9.28	9.84	8.15	9.47	5.97	3.99	0.59
15039	5.84	2.71	2.74	2.59	4.35	7.76	6.85	8.20	6.44	5.69	2.86	1.72
17018	2.89	1.33	1.58	1.35	6.50	11.72	10.80	10.38	10.78	6.41	2.27	1.03
17024	2.75	0.73	1.61	1.80	6.05	11.63	10.35	10.40	10.49	7.00	2.38	0.86
17039	5.03	1.79	2.07	3.71	8.77	14.84	15.44	16.06	11.94	8.99	4.14	1.33
17005	2.99	0.94	1.41	1.36	4.32	11.39	10.22	8.22	9.68	5.74	3.47	0.87
17012	3.00	0.85	1.76	1.72	5.24	10.49	11.82	8.39	10.43	5.64	2.73	1.33

STATION	PCPSKW1	PCPSKW2	PCPSKW3	PCPSKW4	PCPSKW5	PCPSKW6	PCPSKW7	PCPSKW8	PCPSKW9	PCPSKW10	PCPSKW11	PCPSKW12
15103	8.82	7.33	6.36	5.24	3.48	2.03	7.85	3.46	2.89	3.25	6.04	7.95
17001	11.17	11.53	12.24	7.76	3.78	2.26	3.17	2.93	3.27	8.63	5.92	7.58
15039	10.07	5.93	9.37	3.82	3.03	3.14	2.39	3.49	2.92	4.78	9.77	12.70
17018	8.56	9.29	13.81	6.73	5.25	2.71	3.21	2.75	3.35	4.43	9.65	11.55
17024	9.95	9.15	16.14	8.87	4.13	3.03	3.64	3.56	2.06	5.14	7.56	11.28
17039	8.52	5.78	10.09	5.44	6.72	2.93	1.98	3.18	2.00	4.12	6.42	7.81
17005	9.95	9.41	14.00	4.90	5.05	2.56	2.69	2.60	2.45	3.92	9.47	13.21
17012	9.56	10.04	13.75	5.47	4.17	2.17	3.10	2.38	2.67	5.69	6.80	11.21

STATION	PR_W1_1	PR_W1_2	PR_W1_3	PR_W1_4	PR_W1_5	PR_W1_6	PR_W1_7	PR_W1_8	PR_W1_9	PR_W1_10	PR_W1_11	PR_W1_12
15103	0.04	0.07	0.05	0.16	0.31	0.42	0.59	0.54	0.51	0.18	0.08	0.04
17001	0.00	0.01	0.01	0.04	0.09	0.26	0.32	0.20	0.25	0.09	0.08	0.02
15039	0.03	0.07	0.04	0.16	0.29	0.40	0.61	0.57	0.39	0.17	0.07	0.04
17018	0.02	0.03	0.02	0.06	0.21	0.41	0.45	0.39	0.40	0.12	0.04	0.02
17024	0.02	0.03	0.02	0.05	0.21	0.38	0.49	0.43	0.41	0.15	0.04	0.02
17039	0.03	0.07	0.03	0.12	0.29	0.40	0.54	0.58	0.40	0.17	0.07	0.03
17005	0.03	0.03	0.03	0.07	0.23	0.43	0.47	0.41	0.47	0.14	0.04	0.02
17012	0.02	0.03	0.03	0.08	0.25	0.42	0.49	0.36	0.41	0.14	0.04	0.01

STATION	PR_W2_1	PR_W2_2	PR_W2_3	PR_W2_4	PR_W2_5	PR_W2_6	PR_W2_7	PR_W2_8	PR_W2_9	PR_W2_10	PR_W2_11	PR_W2_12
15103	0.43	0.34	0.43	0.57	0.65	0.80	0.80	0.79	0.74	0.56	0.33	0.26
17001	0.75	0.50	0.00	0.48	0.66	0.61	0.49	0.64	0.60	0.45	0.37	0.10
15039	0.45	0.42	0.42	0.53	0.55	0.72	0.77	0.72	0.69	0.47	0.30	0.22
17018	0.56	0.23	0.13	0.26	0.46	0.67	0.63	0.64	0.66	0.45	0.19	0.13
17024	0.47	0.17	0.18	0.44	0.48	0.68	0.66	0.65	0.70	0.47	0.32	0.42
17039	0.52	0.30	0.25	0.51	0.55	0.82	0.78	0.78	0.81	0.57	0.35	0.20
17005	0.44	0.21	0.29	0.37	0.50	0.69	0.66	0.67	0.66	0.41	0.25	0.27
17012	0.47	0.23	0.15	0.43	0.47	0.68	0.63	0.73	0.67	0.42	0.26	0.29

STATION	PCPD1	PCPD2	PCPD3	PCPD4	PCPD5	PCPD6	PCPD7	PCPD8	PCPD9	PCPD10	PCPD11	PCPD12
15103	1.77	2.67	2.33	7.67	14.42	19.75	23.42	21.83	20.25	9.42	3.50	1.58
17001	0.31	0.33	0.25	1.75	5.67	11.42	12.67	10.83	11.58	4.67	3.42	0.83
15039	1.69	3.00	2.17	7.67	11.58	17.00	22.92	20.67	17.00	7.83	3.08	1.50
17018	1.23	1.08	0.67	2.25	8.50	15.92	17.75	15.75	16.33	6.17	1.75	0.67
17024	1.15	1.00	0.92	2.67	8.58	15.92	18.50	16.92	17.50	7.08	2.08	1.00
17039	1.77	2.50	1.33	5.92	11.50	20.08	22.33	22.17	20.58	9.25	3.08	1.25
17005	1.23	1.17	1.17	3.17	9.25	16.83	18.50	16.83	17.50	6.75	1.67	0.92
17012	1.15	1.08	1.08	3.67	9.58	16.17	18.33	17.17	17.17	6.08	1.92	0.58

STATION	RAINHH MX1	RAINHHM X2	RAINHHM X3	RAINHHM X4	RAINHHM X5	RAINHHM X6	RAINHHM X7	RAINHHM X8	RAINHHM X9	RAINHHMX 10	RAINHHMX 11	RAINHHMX 12
15103	5.19	2.85	4.40	5.22	6.76	10.29	27.07	11.27	11.30	3.34	3.28	1.18
17001	2.34	0.89	2.49	1.07	5.53	14.14	11.00	12.72	11.29	4.92	4.75	1.24
15039	5.19	2.85	4.40	5.22	6.76	10.29	27.07	11.27	11.30	3.34	3.28	1.18
17018	2.34	0.89	2.49	1.07	5.53	14.14	11.00	12.72	11.29	4.92	4.75	1.24
17024	2.34	0.89	2.49	1.07	5.53	14.14	11.00	12.72	11.29	4.92	4.75	1.24
17039	5.24	2.13	6.77	5.14	5.51	11.35	11.32	15.76	10.63	6.70	3.10	2.53
17005	2.34	0.89	2.49	1.07	5.53	14.14	11.00	12.72	11.29	4.92	4.75	1.24
17012	2.34	0.89	2.49	1.07	5.53	14.14	11.00	12.72	11.29	4.92	4.75	1.24

STATION	SOLARA V1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12
15103	27.88	30.57	35.52	38.24	39.68	39.84	39.66	38.77	36.46	32.91	28.90	26.66
17001	27.95	30.76	35.55	38.25	39.65	39.79	39.63	38.75	36.48	32.96	28.98	26.74
15039	27.87	30.57	35.52	38.24	39.68	39.84	39.66	38.77	36.46	32.91	28.90	26.66
17018	28.04	30.97	35.59	38.25	39.62	39.75	39.59	38.74	36.50	33.02	29.07	26.83
17024	27.98	30.84	35.57	38.25	39.64	39.78	39.61	38.75	36.49	32.98	29.01	26.78
17039	27.90	30.63	35.53	38.24	39.67	39.82	39.65	38.76	36.46	32.93	28.93	26.68
17005	28.01	30.91	35.58	38.25	39.63	39.76	39.60	38.75	36.49	33.00	29.04	26.81
17012	27.96	30.79	35.56	38.25	39.65	39.79	39.62	38.75	36.48	32.97	28.99	26.76

STATION	DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12
15103	3.10	3.40	3.91	5.62	7.36	8.66	8.63	8.74	8.72	7.40	5.10	4.68
17001	9.73	8.96	8.02	9.20	11.55	14.05	14.75	15.07	15.37	14.14	11.95	10.85
15039	2.69	2.68	2.38	4.46	7.04	8.94	9.54	9.43	9.91	8.17	5.64	4.01
17018	9.25	9.76	9.44	12.06	15.40	18.32	18.29	18.11	19.05	17.09	13.46	11.75
17024	7.92	8.19	7.26	9.40	12.72	15.76	16.18	15.93	16.78	14.92	11.47	9.98
17039	4.13	3.93	3.36	5.05	7.34	9.44	9.79	9.65	10.32	9.25	7.05	5.87
17005	8.86	9.05	8.70	10.84	13.71	16.31	16.32	16.23	16.84	15.22	12.25	11.00
17012	9.72	9.65	9.20	11.26	13.80	16.18	16.51	16.25	16.89	15.44	12.80	11.66

STATION	WNDV1	WNDV2	WNDV3	WNDV4	WNDV5	WNDV6	WNDV7	WNDV8	WNDV9	WNDV10	WNDV11	WNDV12
15103	6.22	7.42	7.92	8.25	8.21	6.58	6.64	6.92	6.46	5.80	5.79	5.69
17001	5.87	7.00	7.65	8.10	7.96	6.53	6.50	6.67	6.21	5.62	5.55	5.32
15039	6.16	7.29	7.88	8.20	8.14	6.65	6.68	6.90	6.43	5.92	5.75	5.55
17018	5.32	6.39	7.19	7.85	7.59	6.33	6.18	6.28	5.81	5.22	5.20	4.86
17024	5.29	6.33	7.15	7.83	7.57	6.31	6.16	6.27	5.79	5.21	5.18	4.83
17039	5.66	6.73	7.47	7.97	7.79	6.47	6.40	6.54	6.06	5.56	5.42	5.11
17005	5.68	6.80	7.50	8.02	7.83	6.47	6.39	6.52	6.07	5.46	5.43	5.16
17012	5.66	6.76	7.47	8.00	7.81	6.46	6.38	6.52	6.05	5.48	5.42	5.13

Anexo 6. Datos climáticos del periodo 2002 a 2011 ingresados al SWAT.

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS
15039	19.08694	-98.88472	2543	10
15103	19.08361	-98.73833	2620	10
17001	18.933	-98.9	1631	10
17005	18.81028	-98.95084	1302	10
17012	18.90639	-98.97028	1380	10
17018	18.75917	-99.12111	970	10
17024	18.867	-99.083	1231	10
17039	19.03917	-99.09389	2836	10

STATION	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12
15039	20.62	22.78	24.39	25.34	25.36	23.01	22.17	21.98	21.31	21.52	20.90	20.18
15103	21.79	22.97	25.12	26.63	26.33	24.28	22.90	23.23	22.34	22.69	22.63	21.58
17001	25.87	27.69	29.84	31.58	30.57	28.02	26.06	26.26	25.23	25.72	25.50	25.34
17005	27.62	30.34	33.21	35.09	34.96	31.11	29.20	29.24	28.58	28.51	27.74	27.09
17012	26.58	28.21	30.30	32.30	32.15	29.86	28.05	28.17	27.29	27.59	26.84	26.10
17018	30.15	31.75	34.18	36.75	35.87	32.94	31.49	31.41	30.85	30.78	30.40	29.76
17024	19.50	21.60	24.08	25.54	24.18	21.60	19.52	19.57	18.67	19.42	19.49	19.15
17039	19.50	21.60	24.08	25.54	24.18	21.60	19.52	19.57	18.67	19.42	19.49	19.15

STATION	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12
15039	5.37	6.46	7.77	9.99	10.13	10.56	10.40	10.29	10.28	9.02	6.94	5.47
15103	4.61	5.59	7.19	9.23	9.74	9.90	9.56	9.64	9.50	8.07	6.16	4.99
17001	11.23	11.73	12.37	13.95	13.85	14.52	13.48	13.63	13.51	12.71	11.51	10.49
17005	10.60	11.98	13.68	15.77	16.82	16.64	16.12	15.94	15.97	14.69	11.90	10.33
17012	12.38	13.49	15.09	17.03	17.72	17.25	16.22	16.18	16.09	14.83	13.08	11.75
17018	11.09	12.35	14.05	17.64	19.46	20.09	19.62	19.99	20.40	18.40	13.94	11.11
17024	8.08	8.88	10.09	11.90	12.49	12.49	11.44	11.65	11.62	10.17	9.27	8.08
17039	8.08	8.88	10.09	11.90	12.49	12.49	11.44	11.65	11.62	10.17	9.27	8.08

STATION	TMPSTD X1	TMPSTD X2	TMPSTD X3	TMPSTD X4	TMPSTD X5	TMPSTD X6	TMPSTD X7	TMPSTD X8	TMPSTD X9	TMPSTD 10	TMPSTD 11	TMPSTD 12
15039	2.45	2.37	2.15	2.22	2.24	2.41	1.73	1.62	1.58	1.83	2.76	2.75
15103	3.56	3.27	3.46	3.42	4.10	4.29	3.70	3.72	3.58	4.20	3.49	3.72
17001	3.57	3.12	3.14	2.57	2.37	2.74	2.65	2.41	2.23	2.13	2.56	2.70
17005	1.84	1.78	1.89	1.84	2.21	2.66	1.51	1.39	1.32	1.42	1.55	1.44
17012	2.03	2.16	1.60	1.64	1.77	2.30	1.81	1.38	1.33	1.71	1.73	1.46
17018	2.44	2.56	2.15	2.32	2.10	2.49	2.04	1.97	1.97	1.96	2.07	1.92
17024	1.98	2.28	2.07	2.16	2.63	3.49	2.01	1.79	1.67	1.82	1.98	1.59
17039	1.98	2.28	2.07	2.16	2.63	3.49	2.01	1.79	1.67	1.82	1.98	1.59

STATION	TMPSTD N1	TMPSTD N2	TMPSTD N3	TMPSTD N4	TMPSTD N5	TMPSTD N6	TMPSTD N7	TMPSTD N8	TMPSTD N9	TMPSTD 10	TMPSTD 11	TMPSTD 12
15039	1.99	2.07	1.96	1.53	1.63	1.26	1.06	0.97	1.06	1.87	2.43	2.09
15103	2.04	1.97	2.16	1.72	1.67	1.67	1.32	1.24	1.60	2.27	2.43	1.88
17001	2.46	2.36	2.12	1.68	2.35	2.60	2.18	1.84	1.97	1.82	2.16	2.37
17005	1.76	1.62	1.64	1.72	1.53	1.15	1.33	1.10	1.10	1.94	2.32	1.91
17012	1.60	1.72	1.70	1.66	1.43	1.30	1.18	1.24	1.31	1.89	2.06	2.00
17018	2.60	2.63	2.65	2.15	2.05	1.81	2.15	2.38	2.41	2.95	3.20	2.87
17024	1.66	1.82	1.55	1.57	1.43	1.82	1.29	1.12	1.16	1.69	1.93	2.01
17039	1.66	1.82	1.55	1.57	1.43	1.82	1.29	1.12	1.16	1.69	1.93	2.01

STATION	PCPMM1	PCPMM2	PCPMM3	PCPMM4	PCPMM5	PCPMM6	PCPMM7	PCPMM8	PCPMM9	PCPMM10	PCPMM11	PCPMM12
15039	32.21	34.41	7.70	30.53	68.79	142.12	155.53	170.70	154.19	60.82	26.98	16.99
15103	16.32	23.63	11.67	22.23	64.94	155.79	155.33	160.10	127.26	71.58	16.83	3.60
17001	12.26	15.99	3.62	14.31	51.30	198.70	243.95	254.48	228.96	78.22	18.64	1.05
17005	7.40	9.10	3.55	9.70	43.80	181.08	150.16	177.75	199.13	58.80	4.42	0.00
17012	9.60	15.70	2.85	7.64	51.10	209.50	191.88	239.77	228.20	71.54	11.74	0.70
17018	7.75	9.00	3.10	11.05	59.00	173.55	167.61	243.84	225.38	65.48	6.09	0.00
17024	18.54	25.92	7.70	21.16	63.99	309.77	332.97	374.26	334.74	136.18	19.40	2.63
17039	18.54	25.92	7.70	21.16	63.99	309.77	332.97	374.26	334.74	136.18	19.40	2.63

STATION	PCPSTD1	PCPSTD2	PCPSTD3	PCPSTD4	PCPSTD5	PCPSTD6	PCPSTD7	PCPSTD8	PCPSTD9	PCPSTD10	PCPSTD11	PCPSTD12
15039	4.92	9.39	1.30	4.10	4.71	7.40	8.08	7.59	7.93	5.91	3.68	2.34
15103	2.90	6.91	1.93	2.14	4.94	7.77	7.95	7.09	6.66	5.69	2.39	1.10
17001	2.54	4.40	1.04	3.44	4.73	15.59	12.42	15.75	12.87	6.75	4.09	0.39
17005	1.81	3.20	1.55	1.86	4.74	13.89	9.09	10.76	12.38	6.95	0.91	0.00
17012	2.10	4.87	0.93	1.18	4.58	14.09	11.71	13.25	13.52	8.26	2.19	0.31
17018	1.88	3.46	1.18	2.08	5.62	11.31	9.47	12.76	14.48	6.55	1.32	0.00
17024	3.58	9.74	1.69	2.71	5.76	19.78	15.87	17.38	14.72	12.85	3.78	0.77
17039	3.58	9.74	1.69	2.71	5.76	19.78	15.87	17.38	14.72	12.85	3.78	0.77

STATION	PCPSKW1	PCPSKW2	PCPSKW3	PCPSKW4	PCPSKW5	PCPSKW6	PCPSKW7	PCPSKW8	PCPSKW9	PCPSKW10	PCPSKW11	PCPSKW12
15039	7.29	10.92	8.02	8.97	2.98	3.02	3.09	2.00	2.92	5.99	6.71	6.29
15103	7.26	12.08	7.01	4.61	3.88	2.37	2.39	2.53	2.76	4.19	5.66	14.40
17001	8.81	10.91	10.54	10.77	4.37	7.15	2.11	3.89	2.45	3.41	9.45	13.37
17005	9.84	12.75	15.74	7.16	5.94	4.13	2.86	2.83	3.00	5.34	8.16	0.00
17012	8.40	10.80	14.05	5.53	3.78	4.15	3.04	2.71	3.12	6.33	8.16	14.97
17018	10.47	11.64	15.83	7.90	4.46	3.18	2.99	2.38	3.08	4.90	8.94	0.00
17024	8.84	15.85	8.89	5.52	4.74	5.01	2.10	2.12	1.81	5.92	10.69	12.09
17039	8.84	15.85	8.89	5.52	4.74	5.01	2.10	2.12	1.81	5.92	10.69	12.09

STATION	PR_W1_1	PR_W1_2	PR_W1_3	PR_W1_4	PR_W1_5	PR_W1_6	PR_W1_7	PR_W1_8	PR_W1_9	PR_W1_10	PR_W1_11	PR_W1_12
15039	0.08	0.06	0.05	0.17	0.31	0.59	0.52	0.53	0.46	0.18	0.10	0.10
15103	0.04	0.05	0.06	0.12	0.28	0.47	0.50	0.65	0.42	0.20	0.07	0.03
17001	0.03	0.03	0.02	0.05	0.18	0.35	0.42	0.49	0.37	0.19	0.02	0.01
17005	0.03	0.02	0.01	0.05	0.12	0.33	0.35	0.36	0.33	0.13	0.04	0.00
17012	0.03	0.02	0.02	0.05	0.19	0.42	0.43	0.50	0.44	0.17	0.05	0.01
17018	0.03	0.01	0.02	0.06	0.19	0.41	0.41	0.50	0.33	0.16	0.03	0.00
17024	0.04	0.02	0.03	0.09	0.21	0.33	0.49	0.56	0.47	0.20	0.05	0.01
17039	0.04	0.02	0.03	0.09	0.21	0.33	0.49	0.56	0.47	0.20	0.05	0.01

STATION	PR_W2_1	PR_W2_2	PR_W2_3	PR_W2_4	PR_W2_5	PR_W2_6	PR_W2_7	PR_W2_8	PR_W2_9	PR_W2_10	PR_W2_11	PR_W2_12
15039	0.40	0.36	0.58	0.37	0.58	0.65	0.70	0.70	0.64	0.47	0.34	0.18
15103	0.48	0.38	0.40	0.68	0.54	0.73	0.73	0.80	0.74	0.61	0.43	0.11
17001	0.43	0.31	0.00	0.19	0.44	0.69	0.61	0.64	0.67	0.44	0.41	0.00
17005	0.11	0.29	0.00	0.21	0.33	0.58	0.55	0.62	0.62	0.42	0.00	0.00
17012	0.27	0.44	0.14	0.32	0.33	0.65	0.56	0.71	0.70	0.51	0.24	0.00
17018	0.18	0.20	0.20	0.18	0.37	0.55	0.53	0.65	0.73	0.43	0.08	0.00
17024	0.41	0.53	0.43	0.34	0.40	0.76	0.70	0.78	0.74	0.61	0.27	0.17
17039	0.41	0.53	0.43	0.34	0.40	0.76	0.70	0.78	0.74	0.61	0.27	0.17

STATION	PCPD1	PCPD2	PCPD3	PCPD4	PCPD5	PCPD6	PCPD7	PCPD8	PCPD9	PCPD10	PCPD11	PCPD12
15039	3.50	2.50	2.60	6.30	12.90	18.80	19.70	19.90	17.40	8.10	4.10	3.40
15103	2.10	2.40	2.50	8.10	11.60	18.40	20.50	23.50	19.40	10.70	3.50	0.90
17001	1.40	1.30	0.60	1.60	7.10	15.70	16.70	17.60	16.60	7.30	1.70	0.30
17005	0.90	0.70	0.30	1.40	4.80	12.50	14.00	15.00	14.30	5.70	1.10	0.00
17012	1.10	0.90	0.70	1.90	6.60	15.80	15.70	19.50	18.40	7.80	2.10	0.20
17018	1.10	0.50	0.50	1.70	6.80	14.10	14.80	18.20	16.80	6.70	1.30	0.00
17024	1.70	1.50	1.40	3.50	8.00	17.00	19.50	21.90	19.70	10.60	2.20	0.60
17039	1.70	1.50	1.40	3.50	8.00	17.00	19.50	21.90	19.70	10.60	2.20	0.60

STATION	RAINHHM X1	RAINHHM X2	RAINHHM X3	RAINHHM X4	RAINHHM X5	RAINHHM X6	RAINHHM X7	RAINHHM X8	RAINHHM X9	RAINHHMX 10	RAINHHMX 11	RAINHHMX 12
15039	3.48	3.50	2.24	2.60	5.15	10.52	8.77	12.13	8.56	6.94	2.10	2.61
15103	3.48	3.50	2.24	2.60	5.15	10.52	8.77	12.13	8.56	6.94	2.10	2.61
17001	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17005	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17012	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17018	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17024	1.92	1.92	1.24	2.00	6.28	20.79	11.42	11.02	17.28	5.91	1.24	0.10
17039	5.15	18.48	2.14	3.07	5.33	32.76	19.30	18.11	14.70	22.59	6.81	0.10

STATION	SOLARA1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12
15039	27.87	30.57	35.52	38.24	39.68	39.84	39.66	38.77	36.46	32.91	28.90	26.66
15103	27.88	30.57	35.52	38.24	39.68	39.84	39.66	38.77	36.46	32.91	28.90	26.66
17001	27.95	30.76	35.55	38.25	39.65	39.79	39.63	38.75	36.48	32.96	28.98	26.74
17005	28.01	30.91	35.58	38.25	39.63	39.76	39.60	38.75	36.49	33.00	29.04	26.81
17012	27.96	30.79	35.56	38.25	39.65	39.79	39.62	38.75	36.48	32.97	28.99	26.76
17018	28.04	30.97	35.59	38.25	39.62	39.75	39.59	38.74	36.50	33.02	29.07	26.83
17024	27.98	30.84	35.57	38.25	39.64	39.78	39.61	38.75	36.49	32.98	29.01	26.78
17039	27.90	30.63	35.53	38.24	39.67	39.82	39.65	38.76	36.46	32.93	28.93	26.68

STATION	DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12
15039	2.69	2.68	2.38	4.46	7.04	8.94	9.54	9.43	9.91	8.17	5.64	4.01
15103	3.10	3.40	3.91	5.62	7.36	8.66	8.63	8.74	8.72	7.40	5.10	4.68
17001	9.73	8.96	8.02	9.20	11.55	14.05	14.75	15.07	15.37	14.14	11.95	10.85
17005	8.86	9.05	8.70	10.84	13.71	16.31	16.32	16.23	16.84	15.22	12.25	11.00
17012	9.72	9.65	9.20	11.26	13.80	16.18	16.51	16.25	16.89	15.44	12.80	11.66
17018	9.25	9.76	9.44	12.06	15.40	18.32	18.29	18.11	19.05	17.09	13.46	11.75
17024	7.92	8.19	7.26	9.40	12.72	15.76	16.18	15.93	16.78	14.92	11.47	9.98
17039	4.13	3.93	3.36	5.05	7.34	9.44	9.79	9.65	10.32	9.25	7.05	5.87

STATION	WNDAY1	WNDAY2	WNDAY3	WNDAY4	WNDAY5	WNDAY6	WNDAY7	WNDAY8	WNDAY9	WNDAY10	WNDAY11	WNDAY12
15039	6.16	7.29	7.88	8.20	8.14	6.65	6.68	6.90	6.43	5.92	5.75	5.55
15103	6.22	7.42	7.92	8.25	8.22	6.59	6.65	6.93	6.47	5.80	5.80	5.70
17001	5.87	7.00	7.65	8.10	7.96	6.53	6.50	6.67	6.21	5.62	5.55	5.32
17005	5.68	6.80	7.50	8.02	7.83	6.47	6.39	6.52	6.07	5.46	5.43	5.16
17012	5.66	6.76	7.47	8.00	7.81	6.46	6.38	6.52	6.05	5.48	5.42	5.13
17018	5.32	6.39	7.19	7.85	7.59	6.33	6.18	6.28	5.81	5.22	5.20	4.86
17024	5.29	6.33	7.15	7.83	7.57	6.31	6.16	6.27	5.79	5.21	5.18	4.83
17039	5.66	6.73	7.47	7.97	7.79	6.47	6.40	6.54	6.06	5.56	5.42	5.11