



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN  
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

## **CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO SORDO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO**

**MADAÍ SÁNCHEZ GALINDO**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2015**

La presente tesis, titulada: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO SORDO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO, realizada por la alumna: Madaí Sánchez Galindo, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

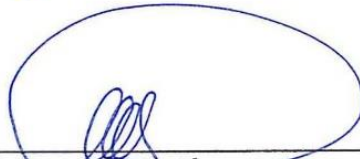
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR


CONSEJERO

  
Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso


ASESOR

  
Dr. Mario R. Martínez Menes

ASESOR

  
M.C. Erasmo Rubio Granados

ASESOR

  
M.C. José Donald Ríos Berber

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2015



## DEDICATORIA

### *❧ A mis padres ❧*

*A mi papá Saúl Sánchez Morales y a mi mamá Gloria Galindo Reyes, quienes son mi ejemplo y orgullo, porque los amo con toda mi alma, y porque gracias a Dios tengo la fortuna de ser hija de los mejores papas del universo.*

### *❧ A mis hermanitas ❧*

*A mis hermanitas Madián Sánchez Galindo y Mavet Sánchez Galindo que estuvieron conmigo siempre dándome su gran amor, alegría, apoyo, y cariño; pues aparte de ser las mejores hermanas que me pudo haber tocado son mis mejores amigas...las amo pequeñas!.*

*Por eso con mucho amor se los dedico a ustedes familia SANGAL, ya que fueron el motor que me llevo a culminar esta etapa de mi vida.*

### *❧ Al amor de mi vida ❧*

*A Mijail Izquierdo Herrera, quien es mi complemento y el amor de mi vida, ¡te amo amor!*

*Con Amor... Madaí Sánchez Galindo*



## AGRADECIMIENTOS

➤ *En primer lugar le doy gracias a Dios, porque sin el nada de esto hubiera sido posible.*

➤ *Le doy gracias a mi bella familia, porque siempre he recibido su apoyo y han estado con conmigo en todo momento, llenando mi vida de amor y consejos llenos de sabiduría que me dieron la fuerza para seguir adelante... LOS AMO papi, mami, Madián y Mavet!*

➤ *A mi novio Mijail Izquierdo Herrera, quien estuvo apoyándome y alentándome a concluir esta etapa de mi vida...te amo con todas mis fuerzas.*

➤ *Al Dr. Demetrio S. Fernandez Reynoso por darme el honor de ser mi cosejero, puesto que es un gran profesor y gran persona; así también por el tiempo que dedico en la realización de esta tesis, gracias profe por su gran amabilidad.*

➤ *A mis queridos asesores: Dr. Mario Martínez Menes, M.C. Erasmo Rubio Granados y al M.C. Donald Ríos Berber quienes con sus valiosos conocimientos enriquecieron el presente trabajo, gracias por su tiempo y dedicación.*

➤ *El presente trabajo de investigación se realizó con el apoyo financiero de la WWF (World Wildlife Fund), a través del Proyecto Mixteca, convenio OP19.*

➤ *Al Ing. Carlos Palacios, que amablemente me brindo su ayuda en muchas ocasiones.*

➤ *A mis grande amigo Omar que más que amigo es un hermano, quien siempre me ha apoyado...gracias por tu amistad!!.*

*Sinceramente... Madaí Sánchez Galindo*



## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE CUADROS .....	x
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. General .....	3
2.2. Particular.....	3
3. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS .....	3
3.1. Hipótesis .....	3
3.2. Supuestos.....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
4.1. Degradación del suelo .....	4
4.2. Tasa de formación y tasa de pérdida de suelo .....	5
4.3. Límites permisibles de erosión .....	6
4.4. Gravedad de la erosión en México .....	7
4.5. ¿Qué es un modelo? .....	8
4.6. Historia del modelado hidrológico .....	8
4.7. Clasificación de los modelos hidrológicos .....	9
4.8. Descripción del modelo SWAT.....	13
4.8.1. Balance hídrico .....	14
4.8.2. Clima .....	17
4.8.3. Erosión .....	17
4.8.4. Datos de Entrada Requeridos por SWAT .....	18
4.9. Calibración y validación de un modelo .....	18
4.9.1. Calibración .....	18
4.9.2. Validación .....	19
4.9.3. Indicadores de eficiencia del modelo .....	19



4.10. Estudios realizados con SWAT .....	20
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
5.1. Caracterización biofísica de la cuenca .....	22
5.1.1. Área de estudio.....	22
5.1.2. Clima .....	26
5.1.3. Geología .....	33
5.1.4. Fisiografía.....	38
5.1.5. Suelos.....	39
5.1.6. Uso de suelo y vegetación .....	42
5.1.7. Hidrología .....	45
5.2. Caracterización morfométrica de la cuenca .....	48
5.2.1. Parámetros de forma.....	48
5.2.2. Parámetros fisiográficos y de relieve.....	51
5.2.3. Parámetros de drenaje .....	55
5.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca .....	58
5.3.1. Grado de marginación .....	58
5.4. Materiales .....	61
5.5. Metodología.....	62
5.5.1. Acopio de la Información de entrada .....	63
5.5.2. Delimitación de la cuenca y alimentación del modelo SWAT .....	74
5.5.3. Calibración del modelo .....	76
5.5.4. Validación del modelo .....	80
6. RESULTADOS .....	80
6.1. Delimitación de la cuenca.....	80
6.2. Calibración del modelo .....	81
6.2.1. Calibración anual de la biomasa .....	81
6.2.2. Calibración de los caudales medios anuales .....	83
6.2.3. Calibración mensual de los escurrimientos .....	85
6.2.4. Calibración anual de sedimentos.....	87
6.2.5. Calibración mensual de sedimentos.....	89
6.2.6. Eficiencia del modelo durante la calibración.....	91
6.3. Validación del modelo .....	92



6.3.1. Validación de los caudales medios anuales.....	92
6.3.2. Validación mensual de los escurrimientos .....	94
6.3.3. Validación anual de los sedimentos .....	96
6.3.4. Validación mensual de los sedimentos.....	98
6.3.5. Eficiencia del modelo durante la validación.....	100
7. CONCLUSIONES .....	102
8. RECOMENDACIONES.....	102
9. LITERATURA CITADA .....	103
10.ANEXOS .....	109
10.1.1. Aspecto.....	145
10.1.2. Curvatura .....	145
10.1.3. Pendiente.....	146
10.1.4. Índice topográfico de humedad .....	146
10.1.5. Índice de posición topográfica.....	148
10.1.6. Longitud de la pendiente.....	148
10.1.7. Precipitación .....	149
10.1.8. Temperatura .....	152
10.1.9. Densidad de drenaje.....	152
10.1.10.Distancia a picos.....	155



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ejemplo que muestra los tres grados de discretización para una cuenca hidrográfica (Fernández, 2012). .....	12
<b>Figura 2.</b>	Clasificación de modelos hidrológicos (Fernández, 2012). .....	13
<b>Figura 3.</b>	Localización de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	23
<b>Figura 4.</b>	Municipios (número oficial) que conforman la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. .. ..... .....	24
<b>Figura 5.</b>	Regiones culturales comprendidas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	26
<b>Figura 6.</b>	Climas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	29
<b>Figura 7.</b>	Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	30
<b>Figura 8.</b>	Precipitación media mensual de tres estaciones meteorológicas representativas de la cuenca. ....	31
<b>Figura 9.</b>	Distribución de la temperatura media anual de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	32
<b>Figura 10.</b>	Temperatura media mensual de tres estaciones representativas de la cuenca. ....	32
<b>Figura 11.</b>	Distribución de los tipos de rocas dentro de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. . ..... .....	36
<b>Figura 12.</b>	Distribución de los tipos de rocas por su origen. ....	37
<b>Figura 13.</b>	Distribución geográfica de los tipos de rocas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 2002). ....	37
<b>Figura 14.</b>	Subprovincias fisiográficas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México... 39	
<b>Figura 15.</b>	Distribución de los suelos en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	39
<b>Figura 16.</b>	Suelos presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca (INEGI, 2004). ....	42





<b>Figura 17.</b>	Distribución de las superficies que comprende cada uso de suelo y vegetación presentes en la cuenca (INEGI, 2014).....	44
<b>Figura 18.</b>	Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 2014).....	45
<b>Figura 19.</b>	Localización de las estaciones hidrométricas y meteorológicas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	46
<b>Figura 20.</b>	Vista aguas arriba y aguas abajo del río Yolotepec desde la estación hidrométrica 20,021 Ixtlayutla.....	47
<b>Figura 21.</b>	Hidrograma de crecida para eventos máximos de precipitación para cuencas alargadas, (Bell, 1999).....	50
<b>Figura 22.</b>	Curva hipsométrica de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	55
<b>Figura 23.</b>	Orden de las corrientes por el método de Strahler, cuenca del río Sordo, Oaxaca México. ....	56
<b>Figura 24.</b>	Densidad de drenaje de la cuenca río Sordo,Oaxaca, México. ....	58
<b>Figura 25.</b>	Grado de marginación que existe en los municipios y localidades de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	60
<b>Figura 26.</b>	Grado de marginación que presentan las localidades del río Sordo, Oaxaca, México. ..	61
<b>Figura 27.</b>	Metodología para la calibración y validación del modelo SWAT, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	63
<b>Figura 28.</b>	Elevaciones presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	64
<b>Figura 29.</b>	Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (WWF, 2014)..	65
<b>Figura 30.</b>	Ejemplo del ajuste del histograma de la variable curvatura. ....	69
<b>Figura 31.</b>	Procedimiento realizado para el ACP detallado de manera general.....	70
<b>Figura 32.</b>	Muestreo de suelos realizado en la cuenca del río Sordo en Oaxaca, México.....	71
<b>Figura 33.</b>	Interface <i>Watershed delineation</i> utilizada para la delimitación de la cuenca. ....	74



<b>Figura 34.</b>	Ventana para la definición de la pendiente.....	75
<b>Figura 35.</b>	Ventana de la función HRU Definition utilizada para definir las HRU de la cuenca. ...	75
<b>Figura 36.</b>	Ventana del SWAT Check donde el SWAT reporta los valores estimados de biomasa media anual.....	77
<b>Figura 37.</b>	Unidades de respuesta hidrológica y subcuencas producto de la delimitación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	81
<b>Figura 38.</b>	Producción de biomasa anual reportada (Salas <i>et al.</i> , 2014) y simulada por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	82
<b>Figura 39.</b>	Relación entre biomasa reportada (Salas <i>et al.</i> , 2014 y simulada por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	83
<b>Figura 40.</b>	Caudales medios anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	84
<b>Figura 41.</b>	Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	85
<b>Figura 42.</b>	Caudales mensuales, observados y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	86
<b>Figura 43.</b>	Relación entre caudales mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	87
<b>Figura 44.</b>	Producción anual de sedimentos, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	88
<b>Figura 45.</b>	Relación entre sedimentos medios anuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	89
<b>Figura 46.</b>	Producción mensual de sedimentos, observados y simulados por el modelo SWAT durante la calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	90
<b>Figura 47.</b>	Relación entre sedimentos mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	91
<b>Figura 48.</b>	Escurremientos anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración (1977-1981) y validación (1982-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	93



<b>Figura 49.</b>	Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	94
<b>Figura 50.</b>	Caudales mensuales, observados y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	95
<b>Figura 51.</b>	Relación entre caudales mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	96
<b>Figura 52.</b>	Producción anual de sedimentos, observados y simulados por SWAT durante su validación (1983-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	97
<b>Figura 53.</b>	Relación entre sedimentos medios anuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	98
<b>Figura 54.</b>	Producción mensual de sedimentos, observados y simulados por el modelo SWAT durante la validación (1983-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	99
<b>Figura 55.</b>	Relación entre sedimentos mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	100
<b>Figura 56.</b>	Ventana de parámetros del Índice de posición topográfica. ....	148
<b>Figura 57.</b>	Ventana para el cálculo de la longitud de la pendiente. ....	149
<b>Figura 58.</b>	Ventana de la herramienta Near en ArcGIS 10. ....	151
<b>Figura 59.</b>	Herramienta raster calculator. ....	153
<b>Figura 60.</b>	Ventana de la herramienta stream link en ArcGIS 10. ....	154
<b>Figura 61.</b>	Ventana de la herramienta Feature vértices to points. ....	154
<b>Figura 62.</b>	Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años (Chen citado por Campos 1998). ....	158
<b>Figura 63.</b>	Número de puntos de suelo coincidentes a los generados por ACP en cada polígono de suelo. ....	161



## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b>	Pérdida de suelo permisible en función de la profundidad del suelo y del material parental (SCS, 1997). .....	7
<b>Cuadro 2.</b>	Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe (Moriasi <i>et al.</i> , 2007). .....	20
<b>Cuadro 3.</b>	Distribución de la población por municipio al año 2010 en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	24
<b>Cuadro 4.</b>	Tipos de rocas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 1980). . ..... .....	33
<b>Cuadro 5.</b>	Unidades de suelos presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	39
<b>Cuadro 6.</b>	Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	43
<b>Cuadro 7.</b>	Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	46
<b>Cuadro 8.</b>	Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México....	47
<b>Cuadro 9.</b>	Clasificación propuesta para el tamaño de cuencas (Campos, 1992). .....	48
<b>Cuadro 10.</b>	Valores interpretativos del factor forma de Horton (1945). .....	49
<b>Cuadro 11.</b>	Formas de la cuenca según su coeficiente de compacidad (FAO, 1985) .....	52
<b>Cuadro 12.</b>	Características cualitativas del relieve de una cuenca según su pendiente (Pérez, 1979). .....	53
<b>Cuadro 13.</b>	Cálculo de la curva hipsométrica para la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	53
<b>Cuadro 14.</b>	Número de corrientes de la cuenca, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ....	55
<b>Cuadro 15.</b>	Cálculo de la relación de bifurcación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México. ...	57
<b>Cuadro 16.</b>	Superficie de las diferentes coberturas vegetales en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (WWF, 2014). .....	65
<b>Cuadro 17.</b>	Descripción de los parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo SWAT. ....	66
<b>Cuadro 18.</b>	Paquete tecnológico del cultivo de maíz para la Mixteca Oaxaqueña (Salas, 2014). .	67
<b>Cuadro 19.</b>	Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático SWAT. ....	71



<b>Cuadro 20.</b>	Datos mensuales de escurrimientos (miles de m <sup>3</sup> ) en la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), Santiago Ixtlayutla, Oaxaca, México.....	73
<b>Cuadro 21.</b>	Datos mensuales de volumen de sedimentos (miles de m <sup>3</sup> ) para la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), Santiago Ixtlayutla, Oaxaca, México.....	73
<b>Cuadro 22.</b>	Producción de biomasa reportada para los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca (INEGI, 2001). .....	76
<b>Cuadro 23.</b>	Parámetros ajustados para la calibración de biomasa.....	77
<b>Cuadro 24.</b>	Parámetros ajustados para la calibración de escurrimientos.....	78
<b>Cuadro 25.</b>	Parámetros ajustados en la calibración de sedimentos.....	79
<b>Cuadro 26.</b>	Factor de cobertura vegetal asignado a cada tipo de vegetación de la cuenca.....	79
<b>Cuadro 27.</b>	Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) para canales (Chow, 1959). ....	80
<b>Cuadro 28.</b>	Biomasa reportada y simulada por el modelo para las diferentes especies vegetales presentes en la cuenca.....	82
<b>Cuadro 29.</b>	Caudales medios anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.....	83
<b>Cuadro 30.</b>	Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante su calibración.....	91
<b>Cuadro 31.</b>	Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante su validación.....	100
<b>Cuadro 32.</b>	Base de datos de factores fisiotécnicos acorde a los requerimientos del modelo SWAT .....	109
<b>Cuadro 36.</b>	Base de datos de suelos acorde a las especificaciones del modelo SWAT .....	116
<b>Cuadro 51.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20187 .....	124
<b>Cuadro 52.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20186 .....	125
<b>Cuadro 53.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20178 .....	126
<b>Cuadro 54.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20130 .....	127
<b>Cuadro 55.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20105 .....	128
<b>Cuadro 56.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20102 .....	129



<b>Cuadro 57.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20094 .....	130
<b>Cuadro 58.</b>	Estadísticas de la estación meteorológica 20076 .....	131
<b>Cuadro 59.</b>	Base de datos de los generadores climáticos acorde a las especificaciones del modelo SWAT. ....	132
<b>Cuadro 72.</b>	Descripción de los factores que influyen sobre la distribución de la precipitación. ...	150
<b>Cuadro 73.</b>	Descripción de los factores que influyen sobre la distribución de la temperatura. ....	152
<b>Cuadro 74.</b>	Datos de lluvia máxima en 24 horas para la estación San Juan Cacahuatpec (CFE), clave 20 010. ....	156
<b>Cuadro 75.</b>	Precipitación máxima mensual en 24 h obtenida para diferentes periodos de retorno mediante la distribución Gumbel tipo I para la estación San Juan Cacahuatpec (CFE), clave 20010. ....	156
<b>Cuadro 76.</b>	Lluvia media mensual de las máximas diarias corregidas por el intervalo fijo de observación para un periodo de retorno de dos años ( $P_{242}$ ) y 10 años ( $P_{2410}$ ). ...	157
<b>Cuadro 77.</b>	Precipitación máxima mensual en media hora y periodo de retorno de 10 años para cada estación.....	159



## CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO SORDO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO

MADAÍ SÁNCHEZ GALINDO, M. EN C.

Colegio de Postgraduados, 2015

### RESUMEN

La cuenca del río Sordo, ubicada al poniente del estado mexicano de Oaxaca, es predominantemente sedimentaria y presenta fuertes problemas de erosión hídrica ( $50$  a  $200$   $t\ ha^{-1}$ ). La cuenca drena  $775,142$  ha y en su desembocadura se localiza la estación hidrométrica Ixtlayutla (clave CONAGUA: 20,021). El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para establecer parámetros útiles en evaluaciones hidrológicas y para tomar decisiones. Para calibrar y validar los principales parámetros del modelo, se utilizaron diez años de información climática (1975 a 1985), se definieron los parámetros fisiotécnicos de 13 coberturas vegetales y se establecieron las propiedades físicas y químicas de 9 tipos de suelos presentes en la cuenca. Con los datos topográficos, edáficos y de cobertura vegetal, la cuenca se dividió en 175 subcuencas y 1,729 unidades de respuesta hidrológica. Para calibración (c) y validación (v) se estimaron los coeficientes de determinación ( $r^2$ ), entre valores observados y simulados, para las producciones anuales de biomasa (0.96 c), agua (0.61 c y 0.61 v), sedimentos (0.79 c y 0.84 v); y para las producciones mensuales de agua (0.84 c y 0.7 v) y sedimentos (0.59 c y 0.58 v). También se determinaron, para calibrar el modelo SWAT, los índices de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) entre valores observados y simulados, para las producciones anuales de biomasa (0.95, excelente), agua (0.65, bueno) y sedimento (0.49, bueno); y las eficiencias mensuales para las producciones de agua (0.83, excelente) y sedimento (0.51, bueno).

**Palabras Clave:** Producción de agua, producción de sedimentos, calibración biomasa, Mixteca Oaxaqueña.



## CALIBRATION AND VALIDATION OF SWAT MODEL FOR THE SORDO RIVER BASIN IN THE MEXICAN STATE OF OAXACA

MADAÍ SÁNCHEZ GALINDO, M. EN C.

Colegio de Postgraduados, 2015

### ABSTRACT

The Sordo's river basin, located west of the Mexican state of Oaxaca, is predominantly sedimentary and presents serious problems of water erosion; 50 to 200 t ha<sup>-1</sup>. The basin drains 775.142 ha and in its mouth is located the Ixtlayutla gauge station (key CONAGUA: 20,021). The objective of this work was to calibrate and validate the hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) to establish useful hydrological parameters in decision-making. In order to calibrate and validate the main parameters of the model, ten years of climate data (1975-1985) were used. Also were defined plant parameters for 13 land covers and physical and chemical properties for 9 types of soils. Base on topographic, soil, and vegetation cover data, the basin was divided into 175 sub-basins and 1,729 hydrological response units. For model's calibration (c) and validation (v) were assess, between observed and simulated value, the determination coefficient ( $r^2$ ) and the Nash-Sutcliffe's efficiency ratio (NSE). This analysis was perform for annual biomass ( $r^2=0.96$  c and NSE=0.95 c), monthly flow rates ( $r^2= 0.84$  c,  $r^2=0.7$  v; NSE=0.83 c, NSE=0.81 v), and monthly sediment yield ( $r^2=0.59$  c and  $r^2=0.58$  v, NSE=0.51 c and NSE=0.45 v). It's concluded that the SWAT model was calibrated and validated satisfactorily and it is recommend, for making decisions, on soil and water conservation management plans on the basin of the Sordo's river, Oaxaca.

**Keywords:** Water yield, sediment yield, biomass calibration, Mixteca region.





## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es el soporte básico imprescindible para la existencia de los ecosistemas terrestres, ya sean naturales o modificados por las actividades humanas; sin embargo, a escala temporal humana, es un recurso natural no renovable.

El suelo, como recurso no renovable, hace que cualquier proceso de degradación que sufra, en la mayor parte de los casos, tenga consecuencias irreversibles. Los ecosistemas agrícolas son particularmente vulnerables a la degradación del suelo dado que su productividad depende en última instancia de las cualidades y estado de conservación del mismo. Debido a que en estos casos, el suelo ha de ofrecer sustancias nutritivas para el buen desarrollo de las plantas o los pastos; principalmente en la capa más superficial. Esta capa, de unos pocos centímetros de espesor, es donde se concentra la mayor fertilidad y donde ocurren los problemas de erosión y en casos más críticos problemas de desbalance entre las tasas de formación del suelo y las tasas de erosión. Así, un centímetro de suelo puede tardar en su formación cientos, e incluso miles de años, en tanto que en un aguacero o ventarrón éste puede perderse en pocos segundos.

El estado de Oaxaca, México se caracteriza por ser una de las entidades más ricas en diversidad de recursos naturales; sin embargo, la región Mixteca presenta una fuerte degradación de sus recursos naturales. La cuenca del río Sordo, tributario del río Verde que desemboca al Océano Pacífico, cubre el 54 % de la Mixteca Oaxaqueña.

Los escurrimientos de esta cuenca se aforan en la estación hidrométrica Ixtlayutla, con número oficial de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 20,021; localizada en las coordenadas geográficas 16° 32' 55.9" N y 97° 34' 0.07" W.

En la cuenca predomina un régimen pluvial que se asocia a los huracanes del pacífico y que producen lluvias de verano intensas (promedio anual de 46 ( $\pm 13.3$ )  $\text{mmhr}^{-1}$ , para un periodo de retorno de 10 años) y que aportan, en promedio 1,229 ( $\pm 594$ ) mm al año.

La cuenca del río Sordo ésta cubierta, en un 70 % de su superficie (545,606 ha), con material geológico de tipo sedimentario y presenta un relieve escarpado (pendiente media el 36.3 %) producto del tectonismo de la placa de Cocos.

La combinación de factores climáticos, geológicos y tectónicos han actuado en forma natural en los procesos erosivos y de sucesión vegetal de la cuenca. Sin embargo, esta situación ha empeorado por cambios en el uso de suelo (principalmente el sobrepastoreo), el aprovechamiento forestal mal regulado y la agricultura en ladera con insuficientes prácticas de conservación de suelo. Así, factores naturales y antropogénicos se han combinado para acelerar la degradación del suelo, la vegetación y el potencial productivo de la cuenca (SEMARNAT y CP, 2003; WWF (*World Wildlife Fund*), 2014a; INEGI, 1980).



Ante esta problemática es necesario planificar la sustentabilidad de los recursos naturales básicos de la cuenca (agua, suelo y vegetación) con fines hidrológicos (escurrimientos y erosión) y productivos (granos, forraje y madera).

Una herramienta de bajo costo y precisión razonable para apoyar la planeación son los modelos de simulación hidrológica integrados a Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos modelos utilizan variables temporales y espaciales de los procesos hidrológicos que ocurren en la naturaleza para simular el flujo de agua y los sedimentos de manera más detallada (Salgado y Güitrón, 2012; FAO, 2013).

Los modelos de simulación hidrológica diseñados hasta la actualidad, incluyen modelos de simulación de eventos que pueden modelar un evento único de precipitación – escorrentía y modelos de simulación continua que incluyen procedimientos que permiten simular la escorrentía causada por lluvias con intervalos de días u horas a lo largo de grandes periodos.

En el presente trabajo se utilizó el modelo de simulación continua SWAT 2012 (*Soil Water Assessment Tools*) de distribución gratuita e interface ArcGIS 10. Este modelo se calibró y validó para simular caudales y sedimentos en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México bajo diversas estrategias de manejo. Esto permitirá a los responsables de los planes de manejo conocer el impacto productivo de las prácticas de manejo propuestas y tomar decisiones sobre el rumbo de la conservación del suelo y la cobertura vegetal de la cuenca.

De acuerdo con los criterios estadísticos, como el coeficiente de determinación e índice de Nash - Sutcliffe, el modelo SWAT simuló de manera satisfactoria la biomasa anual y las producciones de agua y sedimento, mensual y anual, de la cuenca.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1. General

Calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), para estimar, en forma mensual y anual, los escurrimientos y sedimentos producidos por la cuenca del río Sordo, Oaxaca.

### 2.2. Particular

- Determinar la eficiencia del modelo SWAT, a través de la calibración y validación, para estimar biomasa y la producción mensual y anual de escurrimientos y sedimentos.
- Determinar la eficiencia del modelo para estimar la producción de maíz y forraje de las áreas de agostadero.
- Disponer de una herramienta, calibrada regionalmente, para evaluar el impacto hidrológico de futuras acciones de manejo en la cuenca del río Sordo.

## 3. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS

### 3.1. Hipótesis

El modelo hidrológico SWAT determina de manera satisfactoria la producción de biomasa esperada, escurrimientos y sedimentos en la cuenca del río Sordo.

### 3.2. Supuestos

- La información meteorológica, hidrométrica, vectorial y estadística es de buena calidad y estadísticamente consistente.
- Toda el área agrícola esta cultivada con maíz temporal.
- Todas áreas de agostadero están cubiertas de pasto.



## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Degradación del suelo

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre en donde las rocas se han desintegrado por efecto del intemperismo, formando una cubierta en la que viven distintos organismos microscópicos que, actuando en conjunto, transforman materia mineral en alimento para las plantas, para que éstas, a su vez, puedan utilizarse por los animales y los seres humanos.

El suelo permite el establecimiento de actividades forestales, ganaderas y agrícolas, siempre y cuando mantenga su capacidad productiva y de regulación de la calidad del aire y el agua. La importancia del recurso suelo radica en su naturaleza no renovable, debido a que su formación requiere de 100 a 400 años por centímetro de cubierta fértil; a través de la interacción del clima, la topografía, organismos (plantas, animales y el hombre) y minerales. A pesar de su importancia, el ser humano ha acelerado el deterioro y pérdida de este recurso natural básico (Doran, 1996).

La degradación del suelo ocurre a través de diferentes procesos, siendo los más importantes la erosión hídrica y eólica. Cuando tales procesos aparecen en forma natural tienen cierto grado de lentitud y sus manifestaciones no se identifican a corto plazo, sino cuando se encuentra en una fase final, esto es, cuando se ha perdido la mayor cantidad de suelo fértil.

La erosión se define como el proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas del suelo (Kirkby, 1894). La erosión hídrica ocurre cuando el agua de lluvia desprende las partículas de los agregados en la superficie del suelo y estos son arrastrados por el escurrimiento superficial sobre el terreno; este flujo puede acarrear materiales del suelo, en función de su fuerza hidráulica. Conforme aumenta la carga hidráulica, que fluye sobre la superficie, se ejercen fuerzas mayores y la erosión del suelo puede ocurrir aún en pendientes suaves; estas condiciones comúnmente se encuentran en las zonas semiáridas.

La erosión acelerada o inducida inicia con las actividades humanas, principalmente cuando se abren tierras al laboreo agrícola, se fomenta el sobrepastoreo de los agostaderos y se deforestan áreas arboladas o de arbustos. Esta situación se torna crítica cuando los escurrimientos, de estas áreas perturbadas, se concentran aguas abajo formando cárcavas; la cuales crecen a través de movimientos de masas en sus taludes más abruptos (Figueroa *et al.*, 1991).

La erosión del suelo involucra también pérdidas de nutrimentos y materia orgánica, mismo que deben adicionarse al suelo para mantenerlo productivo;



cuando se pierden 50.8 mm de lámina de 304 mm la productividad se reduce hasta en un 75 % (Martínez, 1983).

Al evaluar pérdidas de suelo es común referirlas a las siguientes expresiones:

- a. Pérdida de suelo. Cantidad de suelo removido por la erosión en un período específico.
- b. Producción de sedimentos. Es el flujo de sedimentos de una cuenca hidrológica o de área sujeta a evaluación durante un tiempo determinado; no toda la pérdida de suelo se deposita en el sistema de corrientes (una parte se deposita en depresiones de la misma cuenca). Por lo anterior, el material que se transporta hacia un punto de interés es la producción de sedimentos.
- c. Tasa de erosión. Es la pérdida de suelo de un área dada y en un tiempo determinado. Se expresa usualmente en unidades de volumen o peso ( $\text{kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ,  $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ,  $\text{cm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  o  $\text{t ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  de lámina de escurrimiento).

Al respecto, Figueroa (1975) reporta tasas de erosión de  $0.01 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para un bosque templado denso y  $0.02 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en un pastizal amacollado.

En México la erosión hídrica y eólica se presenta en 158.8 millones de hectáreas, con pérdidas promedio de  $2.75 \text{ t ha}^{-1}$  por año (CONAZA, 1993).

#### 4.2. Tasa de formación y tasa de pérdida de suelo

Wischmeier y Smith (1978) definen el concepto de Tolerancia de Pérdidas de Suelo como el máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económica e indefinidamente.

La principal dificultad que emerge de esta cuestión, es la acotación del máximo nivel de erosión permisible, el cual a su vez está condicionado por la tasa de formación del suelo; Johnson (1987) reporta algunos estimativos de la tasa de formación del suelo, desde distintas ópticas: bajo condiciones ideales de manejo del suelo, éste podría formarse a una tasa de  $0.8 \text{ mm año}^{-1}$ , es decir,  $11.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Hudson, 1971); bajo condiciones naturales, la tasa de formación podría estar oscilando en un rango de  $0.02$  a  $0.08 \text{ mm año}^{-1}$  es decir, de  $0.28$  a  $1.12 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Pimentel *et al*, 1976); bajo prácticas agrícolas normales, la tasa de formación puede ser de  $0.25 \text{ mm año}^{-1}$  ( $3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Por su parte, Morgan (1986) considera que una tasa de formación adecuada para un suelo agrícolamente productivo, es del orden de  $0.1 \text{ mm año}^{-1}$ , equivalente a  $1.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , asumiéndose una densidad del suelo de  $1.4 \text{ t m}^{-3}$  y basándose en estimativos de meteorización de las rocas.



En términos generales, las pérdidas tolerables de suelo rondan las 11 t ha<sup>-1</sup> (Johnson, 1987), dado que se ha aceptado la proximidad de dicho valor a la máxima tasa de desarrollo del horizonte A bajo condiciones óptimas, Morgan (1986) considera que esta cifra podría distanciarse de la realidad en áreas donde las tasas de erosión son naturalmente altas, como es el caso de terrenos montañosos con alta precipitación, y que se correspondería por tanto con las condiciones generales de América Tropical. De hecho, ésta se encuentra dentro de los reportes más dramáticos en términos de pérdida de suelo, así, de acuerdo con Pimentel *et al.* (1995), citados por Müller y Castillo (1997), en el concierto internacional los niveles más altos de erosión se tienen en Asia, África y Suramérica, con valores promedios entre 30 y 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; sin embargo, en ocasiones pueden alcanzarse valores promedios inusualmente elevados como los 90 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> reportados por Dequi *et al.* (1981) para Huang He, China.

Estas cifras, comparadas con las de formación de suelo, son abismalmente diferentes, pudiendo alcanzar valores de 1 a 2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Asimismo, la cifra inicialmente referida supera los niveles tolerables de pérdida bajo criterios económicos y ecológicos, comúnmente reportados entre 0.2 y 5.0 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para zonas montañosas con suelos superficiales. Bajo tales circunstancias, se sugiere adoptar un valor cercano a 25 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> el cual se encuentra cerca de los sugeridos por Tosi (1972) para condiciones húmedas y muy húmedas de Colombia.

### 4.3. Límites permisibles de erosión

Se ha observado que siempre existen pérdidas de suelo, aunque éstas sean mínimas, para áreas de bosque y pastizal en buenas condiciones. Para que el sistema se mantenga productivo sin sufrir degradación, es decir, con riesgo mínimo a la erosión, estas pérdidas deben ser menores o iguales que las tasas de erosión permisibles.

Los límites permisibles de erosión (LPE) se basa en los siguientes aspectos: que las pérdidas de suelo sean iguales o menores a la velocidad de formación del suelo; que las pérdidas de suelo se mantengan a un nivel que evite la formación de cárcavas y, que las pérdidas de suelo permitan mantener una profundidad de suelo adecuada para sostener una productividad en el tiempo. Los LPE son variables en diferentes sitios, ya que son una función de la profundidad, tipo y procesos formadores de suelo, así como el clima (Ríos, 1987; Figueroa, *et al.*, 1991).

Mientras más profundo sea el suelo superficial (horizontes A y B) y mayor el espesor del material disponible para las raíces de las plantas, la erosión puede ocurrir sin pérdidas irreparables en la capacidad productiva. Generalmente, el material parental no consolidado, es convertido en suelo más rápidamente que el



material rocoso duro. Cuando la capa arable es mucho más fértil y productiva que el subsuelo y el material parental, la pérdida de pequeñas cantidades de suelo superficial podría reducir la productividad significativamente (Frederick *et al.*, 1999).

En 1997 el Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos propuso algunos LPE considerando la pérdida de suelo que un terreno puede tolerar en función a la profundidad del suelo y al material parental (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Pérdida de suelo permisible en función de la profundidad del suelo y del material parental (SCS, 1997).

Profundidad del suelo (cm)	Material parental	LPE (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
>100	Rocoso	11.2
>100	Arena o grava	11.2
50 - 100	Rocoso	9.0
50 - 100	Arena o grava	9.0
25 - 50	Rocoso	4.5
25 - 50	Arena o grava	6.7
10 - 50	Lecho arcilloso	6.7
< 25	Lecho rocoso	2.2
< 25	Arena o grava	4.5
< 10	Lecho arcilloso	4.5

Sin embargo, estos límites deben considerarse con reserva, ya que aún no han sido validados para las condiciones de México, donde posiblemente los procesos de formación del suelo varían con respecto a los Estados Unidos de Norteamérica, debido a diferentes condiciones ambientales. Con esta información y de acuerdo con cada condición podemos aceptar pérdidas de suelo de 2.2 a 11.2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; en caso de que las pérdidas rebasen los LPE, será necesario analizar qué tipo de manejo y vegetación se requiere para disminuir la erosión por debajo del nivel permisible. De aquí surge la necesidad de saber cuánto suelo se está perdiendo y cuanto se puede perder con el manejo de los recursos, es decir cuál es el riesgo a la degradación por erosión (INIFAP, 2007).

#### 4.4. Gravedad de la erosión en México

México se reporta como uno de los países latinoamericanos con erosión más severa (Lal, 1979), la cual se ha favorecido por condiciones naturales como su contrastante distribución climática y accidentado relieve. Pero sin duda, erosión acelerada por la inadecuada explotación de la tierra y por la creciente población nacional, la cual se ha sextuplicado en el último siglo. Este crecimiento ha traído como consecuencias la deforestación excesiva de bosques y selvas, la práctica agrícola en terrenos con fuertes pendientes, y, sobre todo, la ganaderización de



gran parte del país, desde las áreas semidesérticas del norte hasta las cálidas-húmedas del trópico; con sobrepastoreo en muchos casos.

#### 4.5. ¿Qué es un modelo?

La modelación es una herramienta que permite simular los procesos físicos mediante alguna estructura, dispositivo, esquema o procedimiento, para lograr una representación simplificada del sistema, y llegar a conocer, analizar y cuantificar los sistemas reales (Hammerly, 2006).

Law y Kelton citados por Ibañez (2012) definen un modelo como la representación de un sistema, el cual se utiliza para conocer mejor al sistema real y con fines de predicción. Dado que los objetivos o propósitos del sistema pueden ser múltiples, puede ser que un sistema tenga modelos diferentes. Por ejemplo, una cuenca pudiera tener varios modelos; uno pudiera tener el enfoque lluvia-escurrimiento, otro de sedimentos, o de biomasa, o en el mejor de los casos, aunque difícil, un único modelo que integre todo el sistema (Ibañez, 2012).

Según Salgado y Guitrón (2012) “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”.

Un modelo puede ser definido entonces como “un sistema abstracto de interrelación en un determinado intervalo de tiempo, entre una entrada, causa o estímulo de materia, energía o información y una salida, efecto o respuesta de información, energía o materia”. Es una representación simplificada pero nunca una duplicación exacta o completa del sistema. Entre el modelo y el sistema natural deben existir similitudes y de estas dependerá la calidad del modelo, pero este y el sistema natural son básicamente estructuras diferentes. Un modelo no es más que una representación incompleta de la naturaleza, no pudiendo simular cada uno de los aspectos de un sistema natural ni responder a todas las preguntas que podrían formularse. El problema del modelado consiste en decidir cuáles serán los aspectos que deberán representarse, cuales deberán desprejarse y de qué modo hacerlo (Hammerly, 2006).

#### 4.6. Historia del modelado hidrológico

Como ya se mencionó, un “modelo” es una representación simplificada del mundo real, que permite tener una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias. En el caso de los modelos hidrológicos se intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio, generalmente una cuenca, que transforman lluvia en escorrentía.





Podría decirse que la historia del modelaje se remonta al año 1851 cuando el ingeniero irlandés Thomas James Mulvaney publicó la famosa ecuación conocida como el método racional (Eterovic, 2008). A partir de entonces distintos investigadores presentaron sus modelos en un intento de llegar a una mejor aproximación a los valores reales y mayor detalle de los distintos procesos. Por ejemplo, en el año de 1921 Ross planteó la división de la cuenca con base en tiempos de concentración, tomando en cuenta la distribución espacial de los parámetros y/o procesos hidrológicos. A partir de esta idea, Clark formuló en el año de 1945 el procedimiento del hidrograma unitario instantáneo.

Con la invención de la computadora, en la década de 1950, se introdujo una poderosa herramienta que permitió realizar cálculos en forma automatizada y rápida. Así, los modelos hidrológicos han evolucionado aprovechando las ventajas de las computadoras, de allí que a medida que la capacidad de almacenamiento y velocidad de las mismas aumentaba los modelos hidrológicos se hicieron más complejos y mejores para representar los distintos procesos hidrológicos.

Uno de los primeros y más conocidos modelos para cuencas es el *Standford Watershed Model* formulado por Linsley y Crawford en la Universidad de *Standford* en el año de 1966, en base al cual se desarrolló más adelante el *Hydrocomp Simulation Program*, HSP, que incorporaba el modelaje del transporte de sedimentos y la calidad del agua. Para 1976 este se convirtió en el modelo *Hydrologic Simulation Program-Fortran*, HSPF.

Así como este modelo, una gran cantidad de otros modelos se desarrollaron y actualizaron a lo largo de estas cinco décadas de modelaje hidrológico asistido por computadora, como el HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*), el KINEROS (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) y el SWAT del Servicio de investigación de agricultura de los Estados Unidos, entre otros (Eterovic, 2008).

#### **4.7. Clasificación de los modelos hidrológicos**

Según Ponce, citado por Eterovic (2008), los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes grupos:

##### **a) Modelos físicos**

Los modelos físicos son representaciones físicas simplificadas del prototipo. Ejemplos de estos modelos son representaciones a escala de la cuenca o los simuladores de lluvia. Estos modelos son caros y deben construirse especialmente para el caso de estudio.

##### **b) Modelos matemáticos**



Un modelo matemático es una abstracción matemática del prototipo que preserva propiedades importantes de este. Los modelos matemáticos son relativamente más baratos, flexibles, y existen una gran variedad de desarrollos listos para ser usados, ya sea haciendo o no modificaciones para ajustarlo a las condiciones del caso de estudio.

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ✚ **Determinísticos:** se basan en ecuaciones diferenciales formuladas siguiendo las leyes físicas y químicas de los procesos descritos. En estos modelos existe una relación de causa/efecto entre los parámetros y los resultados obtenidos por la solución de las ecuaciones.
- ✚ **Probabilísticos:** los modelos probabilísticos pueden ser de dos tipos
  - i. **Estadísticos:** estos modelos toman en cuenta los parámetros estadísticos de las variables que se desean generar, obtenidos de una serie los valores observados de cada variable.
  - ii. **Estocásticos:** los modelos estocásticos, al igual que los estadísticos, generan valores para cada variable con base en sus parámetros estadísticos, pero toman en cuenta adicionalmente la dependencia que tiene la variable en el tiempo, espacio e incluso con otras variables.
- ✚ **Conceptuales:** Los modelos conceptuales son representaciones matemáticas simplificadas de los procesos físicos, que simulan procesos complejos utilizando pocos parámetros.
- ✚ **Paramétricos:** Estos modelos representan los procesos con base en parámetros empíricos contenidos en ecuaciones algebraicas que contienen uno o más parámetros. Para cada caso en particular se debe encontrar el conjunto de parámetros que mejor ajusta la salida, proceso al cual se denomina calibración. Estos modelos son la forma más sencilla y económica de realizar una modelación. En la actualidad son el tipo de modelo más utilizado.

Fernández (2012), propuso otra clasificación de acuerdo con el tipo de proceso que se desea modelar, dividiéndolos en dos grandes grupos:

- a) **Modelos deterministas:** describen el comportamiento del ciclo hidrológico (o parte de este) en forma de expresiones analíticas que relacionan las interacciones físicas entre sus componentes.

Los tipos de modelos deterministas se definen según el grado de conocimiento que el modelador tenga de las leyes físicas que rigen el sistema estudiado.

- ✚ **Modelos empíricos o de caja negra:** Cuando este conocimiento es muy pequeño o incluso nulo se establecen relaciones matemáticas que a unos determinados valores de las variables de entrada hacen corresponder otros para las variables de salida. Las relaciones matemáticas se establecen por calibración sin que se conozca de qué forma se relacionan las variables.

La ventaja de este tipo de modelos es la facilidad de su uso, mientras que como inconveniente principal, además del poco conocimiento que aporta del sistema, la imposibilidad de extrapolar su aplicación a zonas con condiciones distintas.

- ✚ **Modelos de caja blanca o conceptuales:** Se les denomina así a aquellos modelos en el que las leyes que rigen el comportamiento del sistema son perfectamente conocidas.
- ✚ **Modelos de caja gris:** son aquellos donde no se puede conocer con exactitud todas las componentes del sistema y sus interrelaciones, aunque sí una buena parte de estas. Un ejemplo de estos son los modelos de lluvia-escorrentía. En ellos la variable de entrada es la lluvia, la variable de salida el caudal y ambas se relacionan por una serie de ecuaciones que representan, con mayor o menor fidelidad, los procesos que actúan en la cuenca como la evapotranspiración y la escorrentía; aunque no se conozcan relativamente bien las relaciones funcionales entre estos (Llamas, 1993).

Estos tres tipos de modelos deterministas admiten una segunda clasificación según la variabilidad espacial de los parámetros y/o las variables.

- ✚ **Modelos agregados.** No se considera variabilidad espacial, o dicho de otro modo, son modelos con una sola celda. Supongamos una cuenca hidrográfica que vierte a un río. Al modelarla de forma agregada consideramos por una parte las entradas por precipitación (*input*), y por otra parte los caudales a la salida de la cuenca hidrográfica (*output*). Las magnitudes de los parámetros (p.e. evapotranspiración e infiltración) son valores medios para toda la cuenca considerada. Aunque las salidas de estos modelos proporcionan valores medios, tienen la ventaja de usar expresiones matemáticas sencillas y de no necesitar la calibración de demasiados parámetros.
- ✚ **Modelos distribuidos.** Se considera la variabilidad espacial de variables y de parámetros. Se realiza una discretización del medio físico a estudiar, esto es, se divide la zona a estudiar en celdas con diferentes valores para variables y parámetros. De esta forma,

siguiendo con el caso anterior, para cada celda tendremos un valor de precipitación (*input*) y como respuesta, a este evento y a la interacción con las demás celdas, unos determinados caudales circulantes por cada punto (*output*). Este tipo de modelos, aunque necesitan un aporte de datos mucho mayor y calibrar muchos parámetros, es más versátil y representa de mejor forma la heterogeneidad del medio natural.

✚ **Modelos cuasidistribuidos.** Intentan aprovechar las ventajas de los anteriores, evitando sus inconvenientes. En una cuenca hidrográfica un modelo cuasidistribuido aborda el análisis a través de diferentes subcuencas; proporcionando un alto nivel de precisión pero con una entrada de datos no tan grande.

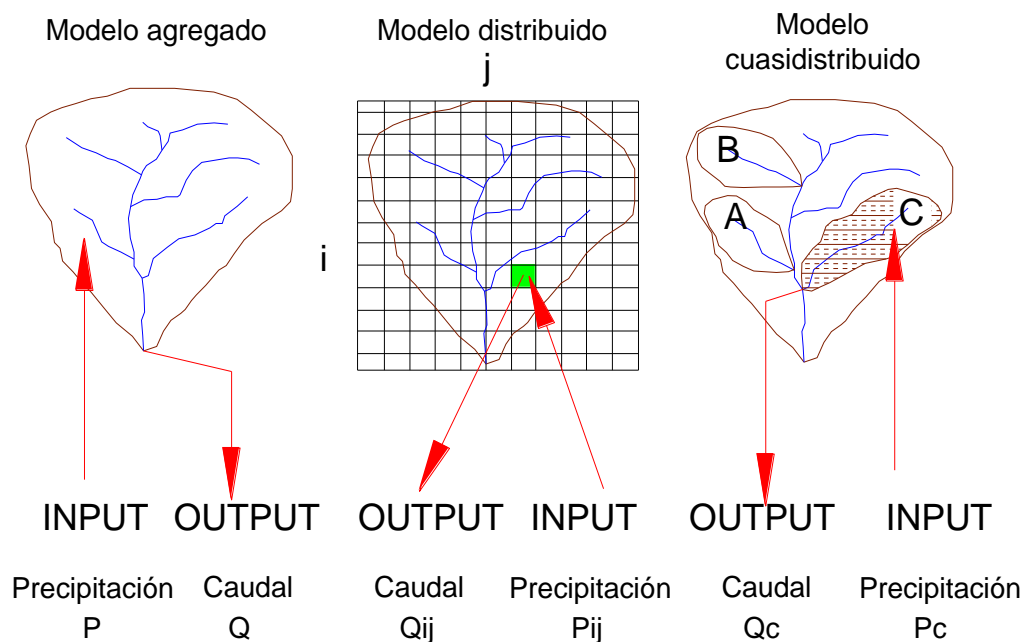


Figura 1. Ejemplo que muestra los tres grados de discretización para una cuenca hidrográfica (Fernández, 2012).

**b) Modelos estocásticos o de series temporales:** carecen de bases físicas y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios. Como pone de manifiesto Marco (1993), el origen de la estocacidad en los recursos hídricos es doble: por una parte la distribución de la lluvia es un procesos aleatorio prácticamente puro, y por otro, la gran cantidad de factores que afectan a la propagación del agua en la superficie

terrestre (conductividades, recorridos del agua, cubierta vegetal, entre otros) le confieren también cierta aleatoriedad.

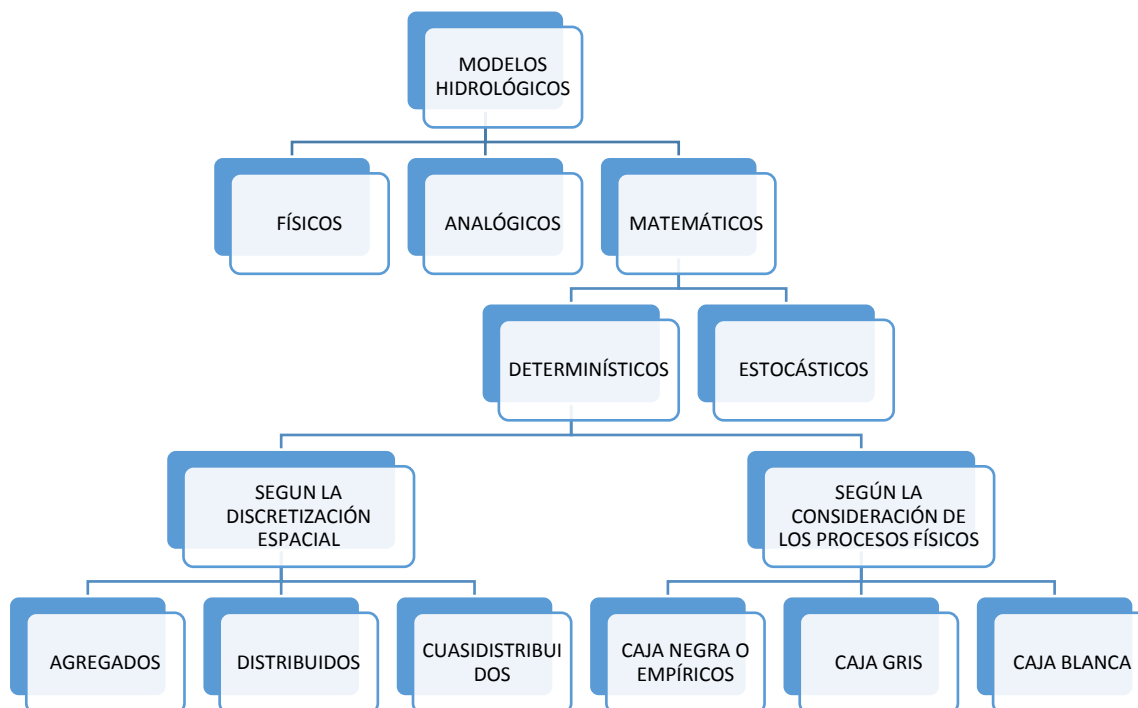


Figura 2. Clasificación de modelos hidrológicos (Fernández, 2012).

#### 4.8. Descripción del modelo SWAT

El *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (USDA por sus siglas en inglés).

SWAT es un modelo a escala de cuenca que opera de manera continua en intervalos diarios. Este se diseñó para simular, en cuencas no instrumentadas, el impacto que tienen las actividades de manejo en la producción de agua, sedimentos y la distribución de los agroquímicos en el ciclo hidrológico (Arnold *et al.*, 1987).

El modelo SWAT utiliza Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) como la unidad básica para los cálculos del modelo. En la definición de las HRU el usuario especifica umbrales entre cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno, los cuales pueden conducir a una pérdida considerable de



información, sobre el paisaje, a medida que aumenten las magnitudes de estos umbrales. Dado que no es claro el nivel de detalle, para subdivisión de la cuenca en HRU, Olena (2013) efectuó un estudio en 30 cuencas montañosas de EUA para analizar el efecto del tamaño de las HRU con la capacidad predictiva de SWAT. En el estudio se observó que no existió un efecto significativo entre el tamaño de las HRU y el rendimiento del modelo. Estos resultados concuerdan con Ella (2015) quien observó poco efecto entre el tamaño de las HRU y los caudales simulados para toda la cuenca, sin embargo, los resultados se vieron afectados a nivel de subcuencas. Por otro lado, observó un efecto mayor para aquellas salidas sensibles a la pendiente y al tipo de suelo como son las simulaciones de sedimentos y carga de nutrientes.

Los principales componentes del modelo pueden ser ubicados en ocho principales divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, plaguicidas y manejo de cultivos. Entre éstos, uno de los más importantes es el que calcula los escurrimientos, dado que sirve de base para los otros submodelos.

#### 4.8.1. Balance hídrico

El modelo se conforma por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico se basa en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$SW_t$ : Contenido de agua en el suelo el día (t)

$SW$ : Agua aprovechable por las plantas: contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar.

$t$ : Tiempo (días)

$R$ : Precipitación diaria (mm)

$Q$ : Escorrentía diaria (mm)

$ET$ : Evapotranspiración diaria (mm)

$P$ : Percolación diaria (mm)

$QR$ : Flujo de retorno o flujo base (mm)

##### 4.8.1.1. Escorrentía (Q)



El escurrimiento superficial o escorrentía es la porción de la lluvia que fluye sobre el suelo en zonas de ladera o de pendiente. La escorrentía se origina de dos formas: 1) por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse), fluye por la superficie pendiente a bajo por el camino de menor resistencia; 2) por las lluvias de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua de exceso (Morgan 1986).

El cálculo de los escurrimientos superficiales se realiza para los días de lluvia y/o deshielo usando la modificación de Williams y Laseur (1976) a la técnica de la curva numérica del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) (1972). Para ello, usan las tres condiciones de humedad con la finalidad de proporcionar estimaciones más realistas del número de la curva.

El cálculo del escurrimiento, según la técnica de las curvas numéricas propuesto por el SCS (1972), se basa en la siguiente ecuación:

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$Q_t$ : Escurrimiento del día t (mm)

$P_t$ : Precipitación total anual del día t (mm)

$I_a$ : Abstracción inicial, antes de que el suelo se sature (mm)

$S_t$ : Retención potencial máxima del día t (mm)

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2 S_t \quad \text{Ecuación (3)}$$

Con base en lo anterior, la ecuación que determina el escurrimiento se transforma en la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S_t)^2}{P_t + 0.8S_t} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

$Q_t$ : Escurrimiento del día t (mm)



$P_t$ : Precipitación total anual del día  $t$  (mm)

$S_t$ : Parámetro de retención del día  $t$  (mm)

La ecuación utiliza un solo parámetro ( $S_t$ ), que es función de la humedad antecedente y del tipo, uso y manejo del suelo en consideración. El valor de  $S_t$  varía entre cero y un valor indeterminado, en principio puede ser muy grande, que suele cambiarse por otro parámetro adimensional y estandarizado, CN. El valor de CN varía entre cero (cuando  $S_t$  es muy grande) y 100 (cuando  $S_t$  es cero), de acuerdo con la relación:

$$S_t = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

$S_t$ : Parámetro de retención del día  $t$  (mm)

CN: Escurrimiento del día  $t$  (mm)

El modelo SWAT también simula el escurrimiento máximo, a través del método racional modificado. El método racional modificado se usa ampliamente en el diseño de drenajes, canales y sistemas para el control de avenidas.

El método racional supone que si una lluvia, de intensidad  $i$ , comienza en el tiempo  $t = 0$  y continua indefinidamente, el escurrimiento se incrementará hasta alcanzar el tiempo de concentración de la cuenca,  $t = t_{conc}$ , es decir, cuando el área total de la cuenca contribuye al flujo de salida. La fórmula racional modificada se expresa de la siguiente manera:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} Q_{sup} A}{3.6 t_{conc}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

$q_{pico}$ : Tasa promedio del escurrimiento máximo ( $m^3 s^{-1}$ )

$\alpha_{tc}$ : Fracción de lluvia que ocurre durante el tiempo de concentración

$Q_{sup}$ : Escurrimiento superficial (mm  $H_2O$ )

$A$ : Área de la cuenca ( $Km^2$ )

$t_{conc}$ : Tiempo de concentración de la cuenca (h)

3.6 : Factor conversión de unidades





#### **4.8.1.2. Percolación (P)**

El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0 y 2 m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m. El componente percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo.

Una vez que el agua percolada alcanza el acuífero profundo, ésta no puede alimentar el escurrimiento.

#### **4.8.1.3. Flujo de retorno**

Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene el caudal de los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación.

#### **4.8.1.4. Evapotranspiración (ET)**

La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimar la Evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (Monteith, 1965), Hargreaves and Sammani (1985) y Priestley –Taylor (1972).

### **4.8.2. Clima**

Las variables climáticas que utiliza SWAT son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles estas se ingresan directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y la precipitación diaria.

### **4.8.3. Erosión**

La erosión y producción de sedimentos se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) (William, 1975). Mientras USLE utiliza la lluvia como indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza el escurrimiento (lámina y caudal) para simular la erosión y la producción de sedimentos.

$$sed = 11.8(Q_{sup}q_{pico}A_{hru})^{0.56}K_{USLE}C_{USLE}P_{USLE}LS_{USLE}CFRG \quad \text{Ecuación (7)}$$



Donde:

$Q_{sup}$ : E scorrimiento superficial (mm H<sub>2</sub>O)

$q_{pico}$ : Caudal promedio del escurrimiento máximo (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

$A_{hru}$ : Área de la HRU (km<sup>2</sup>)

$K_{USLE}$ : Factor de erodabilidad del suelo

$C_{USLE}$ : Factor de cobertura y manejo de USLE

$P_{USLE}$ : Factor de prácticas de conservación de USLE

$LS_{USLE}$ : Factor topográfico

$CFRG$ : Factor de porcentaje de pedregosidad.

#### 4.8.4. Datos de Entrada Requeridos por SWAT

Neitsch (2001) menciona que los datos de entrada del modelo son: modelo digital de elevación, datos diarios de precipitación (uno o varios años), datos diarios de temperatura máxima y mínima, mapas en formato grid y shape de tipos y usos del suelo. Al modelo también se le pueden suministrar datos diarios de velocidad de viento, humedad relativa, intensidad de lluvia en 30 minutos y radiación solar. En caso de no tener estos últimos, mínimamente se le proporcionan valores medios mensuales, tipo “normales climatológicas”, representativos de la cuenca. El modelo también requiere de las características físicas y químicas de los suelos, para una o varias capas.

#### 4.9. Calibración y validación de un modelo

La calibración del modelo y la validación son pasos necesarios y fundamentales en cualquier aplicación de un modelo.

##### 4.9.1. Calibración

Según Donigian, (2002) la calibración es un procedimiento iterativo de evaluación de parámetros y el refinamiento, como resultado de la comparación de los valores simulados y observados de interés.

Según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, citado por Donigian (2002), define la calibración como una prueba del modelo, con información de entrada y salida conocida, para ajustar o estimar factores para los cuales no se dispone de datos.

Cabrera (2000), define la calibración como el proceso por el cual se identifican los mejores valores, de los parámetros del modelo, que ajusten de manera óptima la



serie de datos simulados con la serie de datos observados; donde la bondad de ajuste del modelo se evalúa con una "función objetivo".

#### 4.9.2. Validación

Según Donigian, (2002) la validación del modelo es una extensión del proceso de calibración para corroborar, durante un período adicional, la capacidad del modelo para seguir simulando las observaciones de campo en forma satisfactoria. Su objetivo es verificar que el modelo calibrado continúe evaluando correctamente, sin modificar parámetros, todas las variables y condiciones que pueden afectar los resultados del mismo.

Según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, citado por Donigian (2002) define validación como la comparación de los resultados del modelo con datos numéricos independientes derivados de experimentos u observaciones del entorno.

#### 4.9.3. Indicadores de eficiencia del modelo

**a) Coeficiente de determinación ( $r^2$ ):** Mide la variación de los datos observados por el modelo (valores de 0 a 1) (Santhi *et al.*, 2001).

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})(y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

$y_i^{obs}$ : Rendimiento observado

$y_i^{sim}$ : Rendimiento simulado

$\bar{y}^{obs}$ : Rendimiento medio observado

$\bar{y}^{sim}$ : Rendimiento medio simulado

$n$ : Número total de observaciones

**b) Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe:** Es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos de medición ("información"), representado en la Ecuación 8.

$$NSF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

$O_i$ : Valores observados

$\bar{O}$  : Media de los valores observados

$m_i$ : Valores calculados por el modelo

Este índice produce resultados menores o iguales a 1, si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados; por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica que los valores simulados son muy malos (Moriasi *et al.*, 2007). En el Cuadro 2 se presentan los criterios, adoptando la interpretación recomendada por Nash, para evaluar el poder predictivo de un modelo hidrológico.

**Cuadro 2.** Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe (Moriasi *et al.*, 2007).

NSF	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

**c) Sesgo porcentual (PBIAS):** proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar (valores negativos) o subestimar (valores positivos) la variable de interés (Santhi *et al.*, 2001; Van Liew *et al.*, 2003).

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n y_i^{obs}} \right] \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

$PBIAS$ : Desviación de los datos evaluados (%)

$y_i^{obs}$ : Rendimiento observado

$y_i^{sim}$ : Rendimiento simulado por el modelo

$n$ : Número total de observaciones

#### 4.10. Estudios realizados con SWAT



El modelo SWAT se ha aplicado, con buenos resultados, para modelar los procesos hidrológicos en cuencas nacionales e internacionales. Torres *et al.* (2005) utilizaron el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Laja en Guanajuato, México, para simular escurrimientos anuales. Para calibrar y validar el modelo utilizó 5 años de información obteniendo un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.97 y 0.95, respectivamente.

Trucios *et al.* (2007) aplicaron el modelo SWAT para modelar hidrológicamente la cuenca del río Sextín, Durango, situada en la Sierra Madre Occidental. Para calibrar y validar el modelo utilizó información de uso de suelo y vegetación del INEGI (1976) y edafológica del INEGI (1988). Obtuvo una  $r^2$  de 0.86 y un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.78 para la calibración y un  $r^2$  de 0.83 y NSE de 0.79 para la validación.

Uribe *et al.* (2013) emplearon el modelo SWAT en la cuenca del río Cañete, provincias de Yauyos y Cañete, Perú, para cuantificar la producción de agua, la humedad en el suelo y la recarga de acuífero profundo. Para calibrar y validar el modelo se utilizaron 17 años (1991 a 2009) de información. La capacidad predictiva de este se analizó mediante el coeficiente de correlación, entre caudales simulados y medidos, obteniendo valores de 0.62 (diario) y 0.96 (mensual) y un NSE de 0.3 (diario) y 0.82 (mensual).

#### **4.10.1.1. Calibración con SWAT-CUP**

Ghaffari *et al.* (2010) calibraron y validaron el modelo SWAT, para escorrentía, en una cuenca montañosa de Zanjanrood al noreste de Irán. El periodo de calibración fue de 1998 a 2002 y el de validación de 2003 a 2004. La calibración del modelo se hizo con SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs for SWAT*) a través del método semi automatizado SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*). Para la calibración se obtuvo un coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0.86 y un NSE de 0.79 en comparación con 0.8 y 0.79 para la validación, respectivamente.

Zuleta (2013) calibró el modelo SWAT en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. Para su calibración empleó el programa SWAT-CUP, con SUFI-2, y los caudales para un periodo de registro de 28 años. A nivel mensual el SWAT obtuvo, para la parte alta de la cuenca, un  $r^2 = 0.69$  y NSE = 0.63. El autor concluye que SWAT-CUP es práctico y fiable para calibrar SWAT.

En la cuenca del río Daning, ubicada en la región montañosa de Tres Gargantas, China, Shen *et al.* (2012) calibraron y validaron el modelo SWAT, en términos de escorrentía y sedimentos, mediante el método GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) del SWAT-CUP. Para la calibración y validación de los escurrimientos los coeficientes de NSE fueron 0.94 y 0.78, respectivamente. Para la producción de sedimentos, los coeficientes de NSE para la calibración y validación fueron 0.80 y 0.70, respectivamente. Los resultados indicaron que sólo algunos parámetros tenía un gran impacto en el flujo de la corriente (CN2, ESCO,



SOL\_AWC y CANMX) y la simulación de los sedimentos (CN2, CH\_N2, CANMX, ALPHA\_BNK, SPEXP, SPCON, CH\_COV y CH\_EROD).

#### **4.10.1.2. Flujo base**

Nathan y McMhon (1990) indican que un componente importante en la simulación hidrológica es el caudal base, el cual se conforma por la aportación de diversas fuentes que puede variar estacionalmente y con diferentes tasas de recesión. Por ello, el modelo SWAT no puede simular correctamente el flujo base cuando se utiliza, para el almacenamiento del acuífero superficial, un enfoque conceptual lineal de un depósito. Ejemplo de ello son los estudios de Peterson y Hamlett (1998) quienes encontraron que SWAT no fue capaz de simular el flujo de base debido a la presencia de fragipanes que restringen el flujo de agua del suelo. Asimismo, Chu y Shirmohammadi (2004) encontraron que el flujo base no se simuló adecuadamente para un año extremadamente húmedo. Por otro lado, Wu y Johnson (2007) encontraron que SWAT subestimó el caudal base, especialmente en los años de sequía, principalmente por el desfase temporal entre la acumulación de nieve en invierno y la fusión de la misma en primavera. Aunque Luo *et al.* (2012) encontraron una subestimación del flujo base en el período de bajo caudal en la cuenca del río Manas, norte de las Montañas Tianshan, China, usando SWAT 2005. Arnold *et al.*, 1995 también encontraron que el programa *baseflow filter* es una muy buena opción para calibrar este componente del modelo.

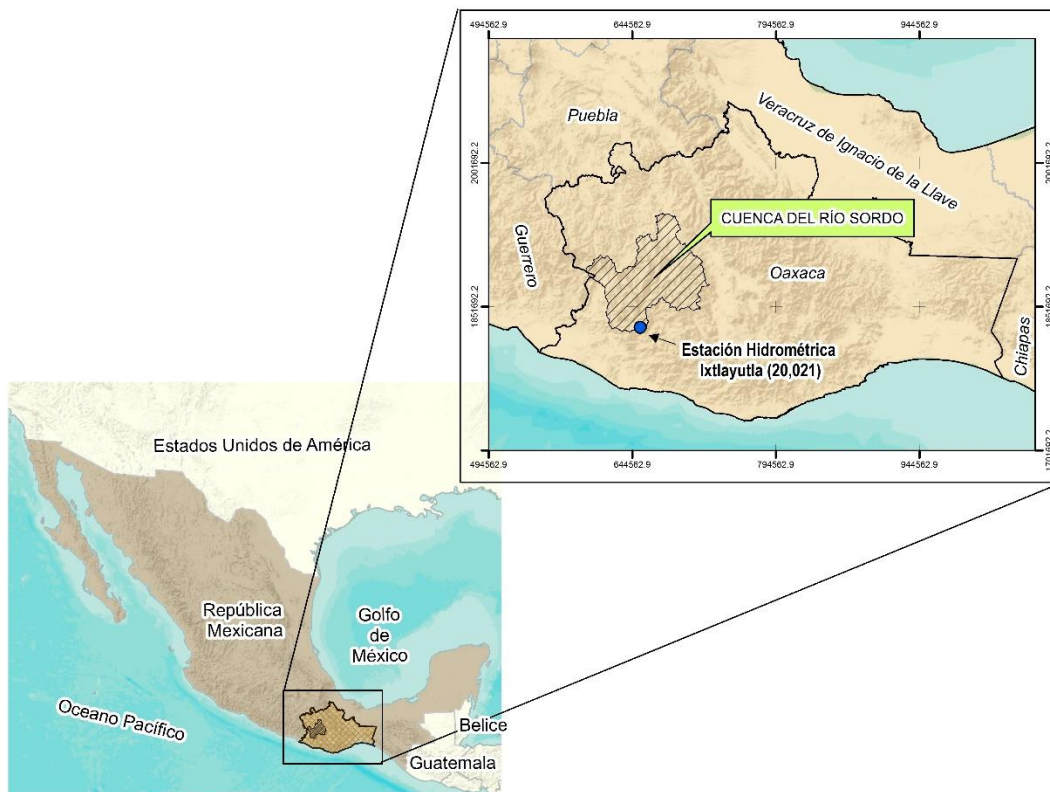
Otro punto importante a tomar en cuenta, para modelar con SWAT, es el cálculo del factor topográfico en las subcuencas. De acuerdo con Rivera *et al.* (2012) cuando las pendiente son superiores a 25 % el modelo realiza una subestimación de la longitud de la pendiente, asignando valores constantes de 0.05 m. En este caso el autor recomienda calcular esta longitud fuera del modelo e introducir el valor correcto en forma manual.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Caracterización biofísica de la cuenca**

#### **5.1.1. Área de estudio**

La cuenca del río Sordo, se ubica geográficamente en los paralelos 17° 37' 19.93", y 16° 29' 43.11" de latitud norte, y entre los 98° 5' 54.34" y 96° 53' 17.86" de longitud oeste (Figura 3). Comprende una superficie de 775,142 ha y tiene su desembocadura en la estación hidrométrica Ixtlayutla.



**Figura 3.** Localización de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

La cuenca abarca 108 municipios (106 del estado de Oaxaca y 2 del estado de Guerrero) y 1,285 localidades. Las localidades más grandes son: Asunción Nochixtlan, ubicada al norte de la cuenca, con una población de 13,284 habitantes; Putla Villa de Guerrero, ubicada al poniente de la cuenca, con una población de 10,925 habitantes; Chalcatongo de Hidalgo, ubicada al centro, con una población de 2,447 habitantes; y Santiago Ixtayutla, al sur, con una población de 1,901 habitantes (Figura 4).

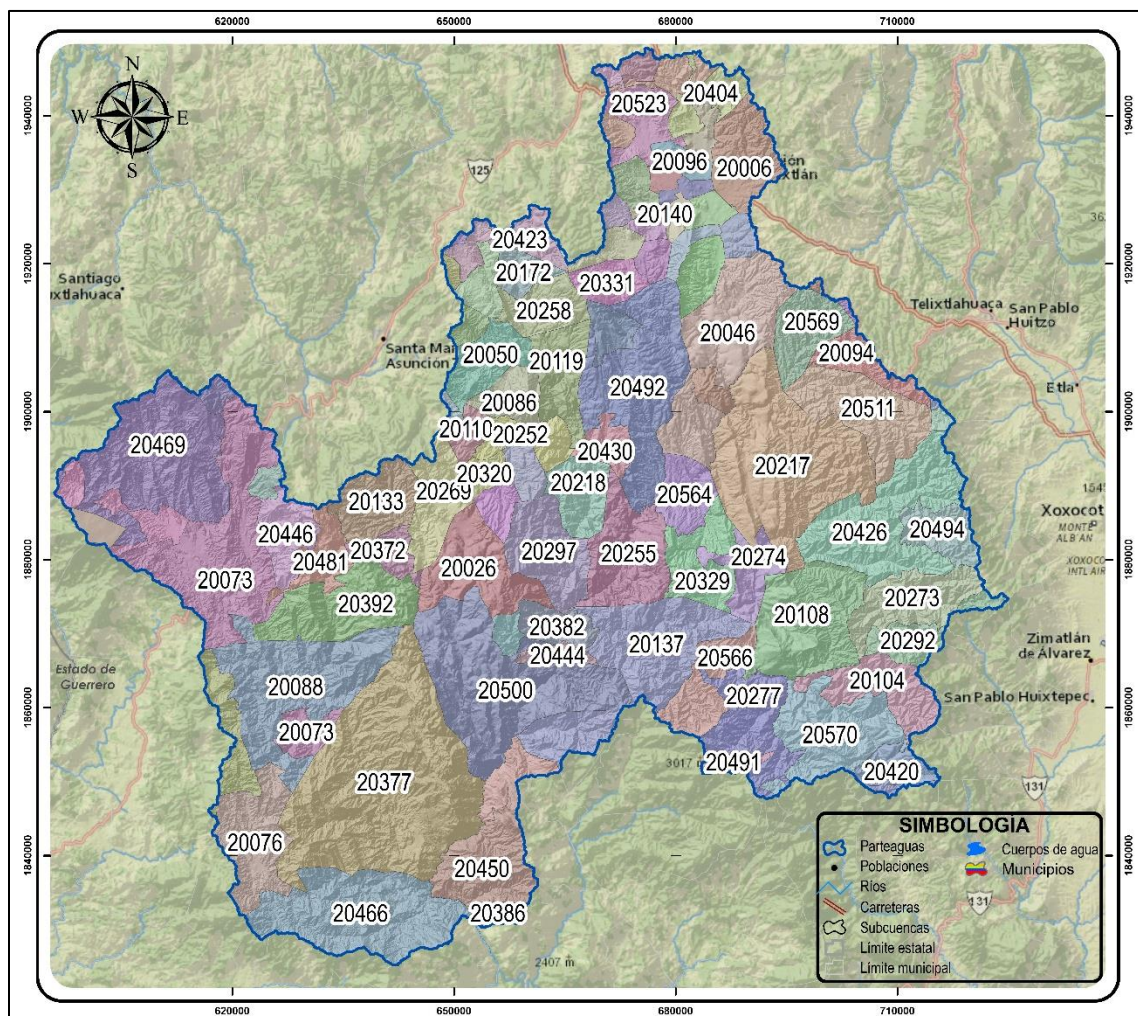


Figura 4. Municipios (número oficial) que conforman la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Cuadro 3. Distribución de la población por municipio al año 2010 en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )	Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )
20422	Santa María Nativitas	681	43.07	20252	San Mateo Peñasco	2116	55.96
20121	San Bartolo Soyaltepec	655	74.90	20426	Santa María Peñoles	7865	233.61
20221	San Juan Teposcolula	1340	86.98	20532	Santo Tomás Ocotepec	4076	80.16
20521	Santo Domingo Tonaltepec	276	26.52	20269	San Miguel el Grande	4127	103.43
20404	Santa María Chachoápam	766	61.81	20445	Santa María Yosoyúa	1642	33.63
20304	San Pedro Coxcattepec	851	94.68	20564	Yutanduchi de Guerrero	1292	64.18
20006	Asunción Nochixtlán	17820	343.48	20320	San Pedro Molinos	723	26.44
20523	Santo Domingo Yanhuitlán	1609	69.63	20218	San Juan Teita	607	71.11
20224	San Juan Yucuita	684	23.39	20133	San Esteban Atatlaha	3974	109.39
20339	San Pedro y San Pablo Teposcolula	3989	178.77	20255	San Mateo Sindhui	2086	141.82





Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )	Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )
20161	San Jerónimo Sosola	2559	220.18	20020	Constancia del Rosario	3860	57.25
20096	San Andrés Sinaxtla	772	22.61	20371	Santa Catarina Ticuá	954	29.83
20499	Santiago Yolomécatl	2021	66.92	20494	Santiago Tlazoyaltepec	4894	63.20
20493	Santiago Tillo	553	17.07	20329	San Pedro Teozacoalco	1320	93.18
20332	San Pedro Topiltepec	406	32.83	20446	Santa María Yucuhiti	6551	73.14
20536	San Vicente Nuñú	493	71.40	20297	San Pablo Tijaltepec	2150	117.71
20215	San Juan Sayultepec	764	14.56	20020	Constancia del Rosario	3860	57.25
20479	Santiago Nejapilla	219	20.46	20481	Santiago Nuyoó	1966	58.19
20423	Santa María Nduayaco	550	76.84	20026	Chalcatongo de Hidalgo	8481	133.60
20250	San Mateo Etlatongo	1181	23.51	20292	San Pablo Cuatro Venados	1388	119.85
20140	San Francisco Chindúa	827	22.59	20274	San Miguel Piedras	1296	65.61
20054	Magdalena Zahuatlán	409	24.84	20372	Santa Catarina Yosonotú	1886	38.35
20239	San Martín Huamelúlpam	1077	42.79	20108	San Antonio Huitepec	4289	191.81
20518	Santo Domingo Tlatayápam	153	11.82	20273	San Miguel Peras	3497	109.66
20281	San Miguel Tecomatlán	308	19.69	20392	Santa Lucía Monteverde	6678	156.70
20383	Santa Cruz Tayata	608	21.79	20037	Mesones Hidalgo	4402	175.11
20562	Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz	1458	39.05	20500	Santiago Yosondúa	7883	334.95
20487	Santiago Tenango	1945	109.22	20048	Magdalena Mixtepec	1304	41.12
20144	San Francisco Jaltepetongo	1110	47.46	20137	San Francisco Cahuacuá	3427	281.02
20147	San Francisco Nuxaño	378	22.62	20570	Zimatlán de Álvarez	19215	354.70
20046	Magdalena Jaltepec	3313	234.88	20382	Santa Cruz Tacahua	1170	47.52
20370	Santa Catarina Tayata	679	38.62	20510	Santo Domingo Ixcatlán	877	17.96
20469	Santiago Juxtlahuaca	32927	775.02	20292	San Pablo Cuatro Venados	1388	119.85
20172	San Juan Achiutla	430	35.63	20566	San Mateo Yucutindó	3034	198.32
20408	Santa María del Rosario	480	25.22	20088	San Andrés Cabecera Nueva	2851	261.30
20331	San Pedro Tidaá	894	45.97	20377	Santa Cruz Itundujia	10975	565.69
20258	San Miguel Achiutla	744	67.64	20123	San Bernardo Mixtepec	2705	108.97
20492	Santiago Tilantongo	3210	248.01	20444	Santa María Yolotepec	461	17.96
20397	Heroica Ciudad de Tlaxiaco	38453	346.85	20104	San Antonino el Alto	2508	105.55
20569	Santa Inés de Zaragoza	1707	83.84	20447	Santa María Zacatepec	15076	502.20
20195	San Juan Diuxi	1256	34.93	20277	Villa Sola de Vega	12525	976.73
20127	San Cristóbal Amoltepec	1283	31.82	20570	Zimatlán de Álvarez	19215	354.70
20483	Santiago Suchilquitongo	9542	95.57	20378	Santa Cruz Mixtepec	3615	46.99
20119	San Bartolomé Yucuañe	399	86.00	20073	Putla Villa de Guerrero	31897	407.56
20050	Magdalena Peñasco	3778	85.15	20271	San Miguel Mixtepec	3245	73.10
20094	San Andrés Nuxiño	1898	64.07	20491	Santiago Textitlán	4170	252.63
20217	San Juan Tamazola	3446	360.11	20420	Santa María Lachixío	1680	49.78
20240	San Martín Itunyoso	2460	63.80	20076	La Reforma	3331	187.20
20511	Santo Domingo Nuxaá	3610	146.47	20535	San Vicente Lachixío	2976	136.90
20102	San Andrés Zautla	4405	69.46	20450	Santiago Amoltepec	12313	207.97
20006	Asunción Nochixtlán	17820	343.48	20466	Santiago Ixtayutla	11917	457.75
20086	San Agustín Tlacotepec	874	51.46	20386	Santa Cruz Zenzontepec	17897	485.73
20531	Santo Tomás Mazaltepec	2333	44.06	20188	San Juan Colorado	9494	124.47
20073	Putla Villa de Guerrero	31897	407.56	20082	San Agustín Chayuco	3952	151.59
20110	San Antonio Sinicahua	1603	29.27	12062	Tlacoachistlahuaca	21306	804.48
20430	Santa María Tataltepec	253	37.11	12071	Xochistlahuaca	28089	454.30

Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )	Clave municipal	Nombre	Población	Superficie (km <sup>2</sup> )
20135	San Felipe Tejalá	7187	99.52				

El estado de Oaxaca está dividido en ocho regiones culturales: la Mixteca, la Cañada, el Papaloapan, Sierra Norte, Valles Centrales, Sierra Sur, la Costa y el Istmo. La cuenca de estudio está comprendida dentro de cuatro regiones culturales (Figura 5): la Mixteca, la cual se ubica al norte y abarca una superficie de 422,018.9 ha (54,4 %); Sierra Sur, al sur de la cuenca y con una superficie de 238,089.2 ha (30.6 %); Valles Centrales, al este y cubriendo una superficie de 90,667.4 ha (11.7 %); y la región de la Costa, al suroeste y ocupando 25,317.7 ha (3.3 %).

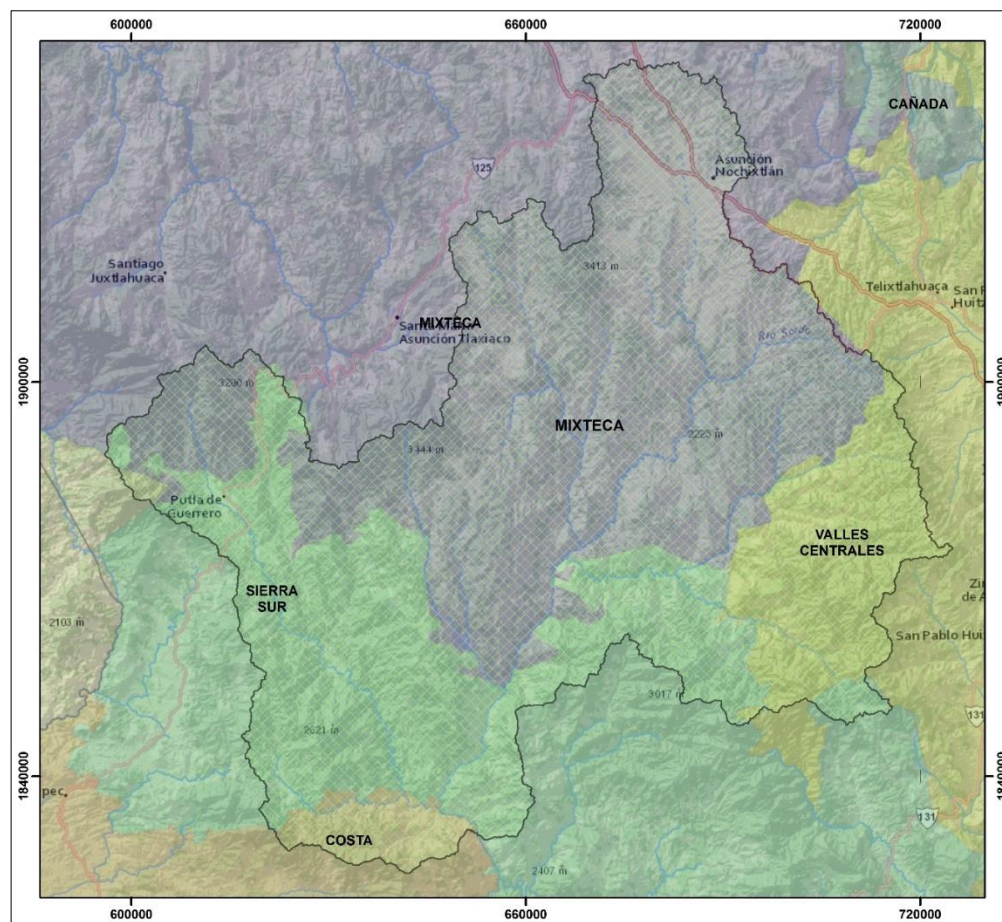


Figura 5. Regiones culturales comprendidas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 5.1.2. Clima



El clima se refiere al conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan, en un punto de la superficie de la tierra, el estado medio de la atmósfera. El clima de una región está controlado por una serie de elementos como: temperatura, humedad, presión, vientos y precipitaciones, principalmente. Estos valores se obtienen a partir del acopio de información meteorológica por períodos suficientemente representativos, al menos 30 años. Factores como la latitud, longitud, relieve, dirección de los vientos, también determinan el clima de una región (INEGI, 2005).

Según el conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales del INEGI (2013), en la cuenca del río Sordo se identifican diez unidades climáticas, que van desde climas cálidos hasta semifríos (Figura 6).

- A continuación se describen los diferentes tipos de climas, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), presentes en la cuenca:
- $A(C)w_2(w)$ : Clima semicálido, el más húmedo de los subhúmedos, con una temperatura media anual entre los  $18^{\circ}$  y  $22^{\circ}\text{C}$ , la temperatura media del mes más frío es superior a  $18^{\circ}\text{C}$  y presenta un régimen de lluvias de verano, con lluvia invernal menor al 5 % del total anual. Este clima es el predominante en la cuenca, 34 % de la superficie, y en él se ubican localidades como Santiago Huaxolotipac y Santa María Naranjo.
- $Aw_0(w)$ : Clima cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, temperatura media anual entre  $22$  y  $26^{\circ}\text{C}$ , temperatura del mes más frío mayor a  $18^{\circ}\text{C}$  y con lluvia invernal menor al 5 % del total anual. Este clima abarca el 2.87 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Cerro Prieto, El Boquerón y Linda Vista.
- $Aw_1(w)$ : Clima cálido, el intermedio de los subhúmedos, con lluvias en verano, con una temperatura media anual entre  $22$  y  $26^{\circ}\text{C}$ , temperatura del mes más frío superior a  $18^{\circ}\text{C}$  y con lluvia invernal menor a 5 % del total anual. Este clima abarca el 0.71 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Chicaba, Chandilly y Rancho Alegre.
- $Aw_2(w)$ : Clima cálido, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano, con temperatura media anual entre  $22$  y  $26^{\circ}\text{C}$ , temperatura del mes más frío superior a  $18^{\circ}\text{C}$  y con lluvia invernal menor a 5 % del total anual. Este clima abarca el 12.4 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Tierra Colorada, El platanal y Asunción Atoyaquillo.
- $BS_1kw(w)$ : Seco, el menos seco de los secos, con invierno fresco, temperatura media anual entre  $12^{\circ}\text{C}$  y  $18^{\circ}\text{C}$ , temperatura del mes más frío entre  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $18^{\circ}\text{C}$ , temperatura del mes más caliente inferior a  $22^{\circ}\text{C}$ , con



lluvias de verano y con lluvia invernal menor a 5 % del total anual. Este clima abarca el 1.12 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Las tres cruces, Rancho la Esperanza y El Llano.

- $C(E)(w_2)(w)$ : Semifrío subhúmedo con lluvias de verano con humedad alta y con lluvia invernal menor del 5 %. Este clima el menos presente en la cuenca (0.74 %) y en él se ubican localidades como Independencia y Llano de los Toros.
- $C(m)(w)$ : Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente abajo de 22°C, con precipitación en el mes más seco inferior a 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. Este clima abarca el 6.54 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Ojo de agua, Mirasol Guerrero y El mirador.
- $C(w_0)(w)$ : Clima templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18°C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55 %. El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. Este clima abarca el 2.72 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Santa Ana, San Francisco y Río Verde.
- $C(w_1)(w)$ : Clima templado subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18°C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55 %. El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. Este clima abarca un 6.98 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Tijua, La Purísima y La Unión.
- $C(w_2)(w)$ : Clima templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18°C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55 %. El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. Este clima abarca un 32.1 % de la superficie de la cuenca y en él se ubican localidades como Ojo de agua, Plan de Ayala y La Paz.

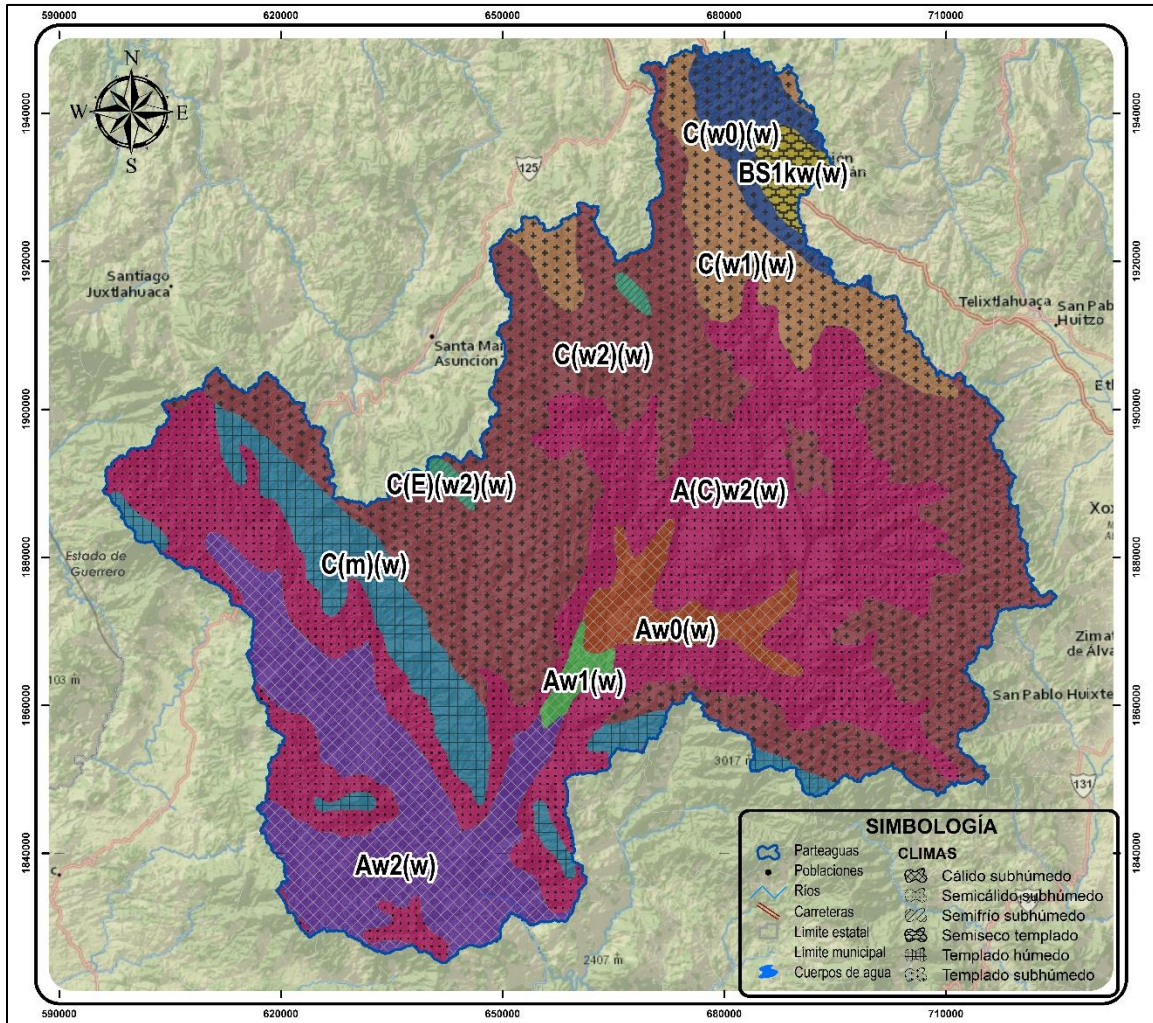


Figura 6. Climas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 5.1.2.1. Precipitación

La precipitación media anual de la cuenca del río Sordo, con base en el método de polígonos de *Thiessen*, es de 1,229 mm. En la cuenca se presenta precipitaciones que van de 400 mm, en la parte norte (municipios como Asunción Nochixtlán, Santa María Chachoápam y San Juan Yucuita), a 1600 mm, en la parte sur (Figura 7); donde se encuentran los municipios de Santiago Ixtlayutla y Santa María Zacatepec.

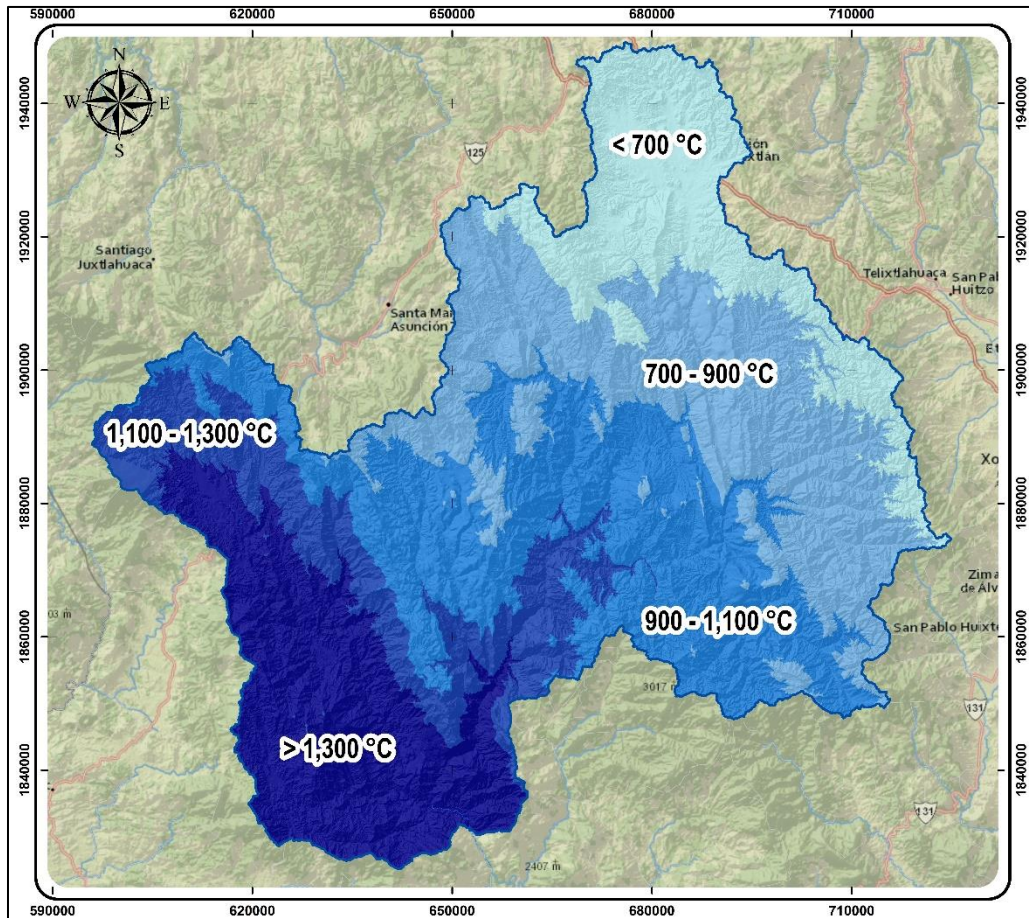


Figura 7. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

La distribución de la precipitación se obtuvo a partir de una interpolación geoestadística e información climática de la base de datos climatológica nacional (CLICOM) de 1961 al 2000 (Dicho procedimiento se detallada en el anexo 9.1.7).

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la precipitación media mensual de tres estaciones representativas de la cuenca, ubicadas al norte (Asunción Nochixtlan 20076), centro (Villa Chalcatongo 20178) y sur (Ixtayutla 20038); donde se observa que el periodo de lluvias se presenta entre mayo y octubre, presentándose precipitación máximas en los meses de junio y septiembre.

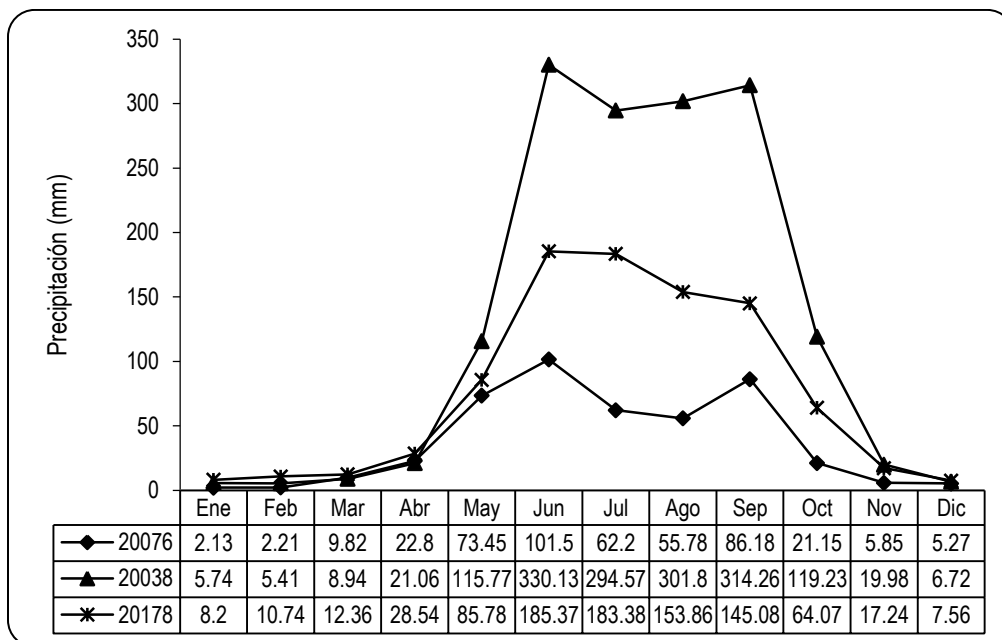


Figura 8. Precipitación media mensual de tres estaciones meteorológicas representativas de la cuenca.

### 5.1.2.2. Temperatura

La cuenca registra temperaturas medias anuales que oscilan entre los 10 °C y 28 °C; las temperaturas más bajas se presentan en regiones con elevaciones que van de los 2,200 a 3,348 msnm, como Santiago Tlazoyaltepec, San Juan Diuxi, San Esteban Atlatlahuaca, entre otras.

Las temperaturas más altas se presentan en regiones con menor altitud como Santiago Ixtayutla, La Reforma, Putla Villa de Guerrero, entre otras (Figura 9).

La distribución de la temperatura media anual, al igual que la precipitación, se obtuvo a partir de una interpolación geoestadística y con información climática del CLICOM de 1961 al 2000 (Dicho procedimiento se detallada en el anexo 9.1.8).

En la Figura 10 se observa el comportamiento de la temperatura media mensual de tres estaciones con elevaciones representativas de la cuenca: Villa Chalcatongo (20178) con 2428 msnm, Ixtayutla (20038) con 610 msnm y Santa María Yucuhitla (20130) con 1876 msnm; Donde se puede observar la oscilación térmica a lo largo de la cuenca, teniendo temperaturas bajas en elevaciones altas y temperaturas altas en elevaciones cercanas al nivel del mar.

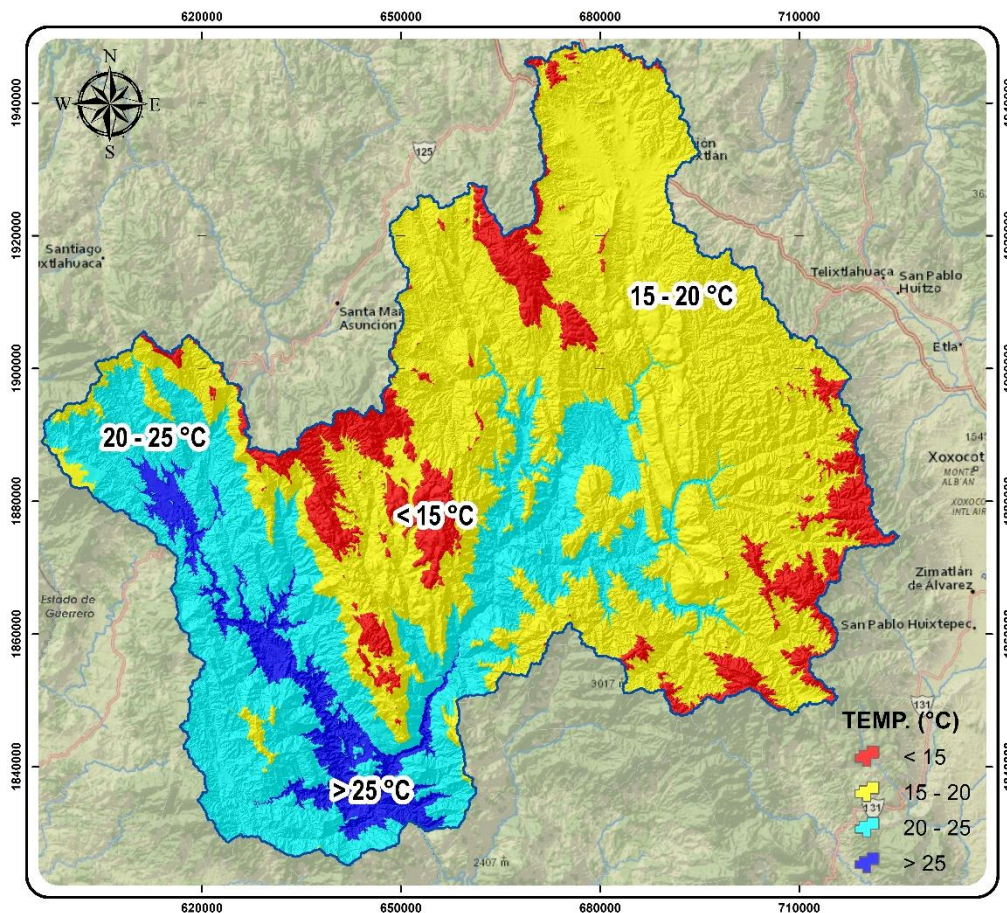


Figura 9. Distribución de la temperatura media anual de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

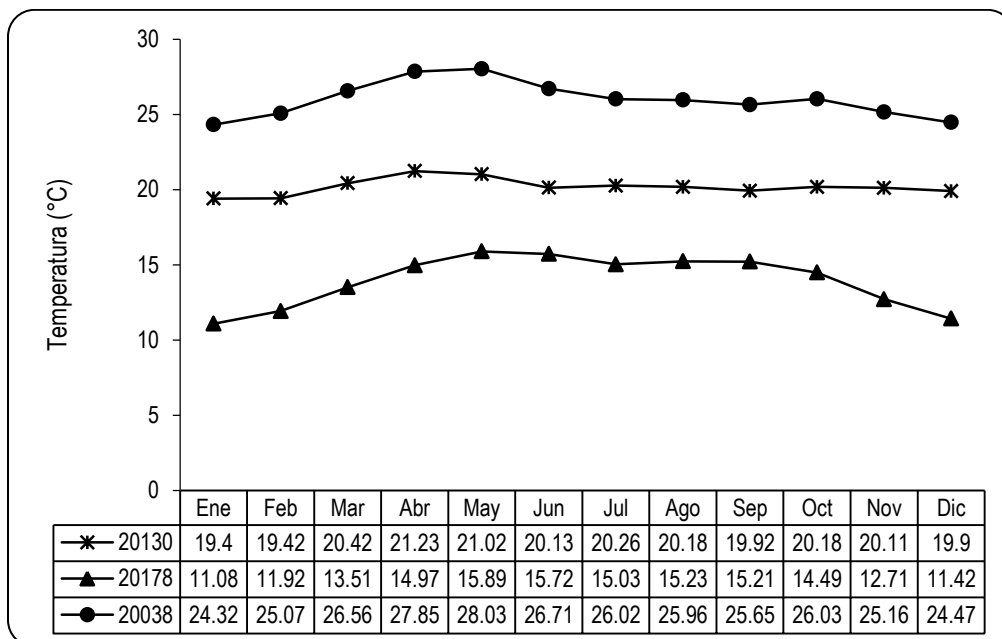


Figura 10. Temperatura media mensual de tres estaciones representativas de la cuenca.



### 5.1.3. Geología

La cuenca del río Sordo, atravesada en su totalidad por la Sierra Madre del Sur, presenta un relieve montañoso de gran complejidad geológica, producto de la subducción de la placa de Cocos en la placa Norteamericana. En esta sierra podemos encontrar rocas ígneas, sedimentarias y la mayor abundancia de rocas metamórficas del país. De igual manera, en la cuenca se tiene como basamento rocas cristalinas, metamórficas, calizas plegadas, sedimentos cuaternarios, así como lavas e intrusiones magmáticas.

Según la carta geológica del INEGI (1980) dentro de la cuenca del río Sordo se encuentran 22 diferentes tipos de rocas. En el Cuadro 4, se describen los diferentes tipos de rocas y la superficie que abarcan.

**Cuadro 4.** Tipos de rocas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 1980).

Clave	Clase	Tipo	Era	Periodo	Superficie	
					ha	%
J-K(cz-lu-ar)	Sedimentaria	Caliza-Lutita-Arenisca	Mesozoico	N/D	72118.97	9.29
Ki(ar-cg)	Sedimentaria	Arenisca-Conglomerado	Mesozoico	Cretácico	13857.85	1.79
Ki(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Mesozoico	Cretácico	2629.84	0.34
Ki(cz)	Sedimentaria	Caliza	Mesozoico	Cretácico	197103.26	25.40
Ki(cz-lu)	Sedimentaria	Caliza-Lutita	Mesozoico	Cretácico	17599.77	2.27
P(E)	Metamórfica	Esquisto	Paleozoico	N/A	53672.17	6.92
P(E-Gn)	Metamórfica	Esquisto-Gneis	Paleozoico	N/A	22138.22	2.85
P(Gr)	Ígnea intrusiva	Granito	Paleozoico	N/A	27530.98	3.55
PE(Gn)	Metamórfica	Gneis	Precámbrico	N/A	108679.46	14.00
Q(al)	N/A	Aluvial	Cenozoico	Cuaternario	11097.11	1.43
Q(re)	N/A	Residual	Cenozoico	Cuaternario	2498.16	0.32
T(Gr)	Ígnea intrusiva	Granito	Cenozoico	Terciario	75479.11	9.73
T(Gr-Gd)	Ígnea intrusiva	Granito-Granodiorita	Cenozoico	Terciario	9622.11	1.24
Ti(ar)	Sedimentaria	Arenisca	Cenozoico	Paleógeno	2226.15	0.29
Ti(ar-cg)	Sedimentaria	Arenisca-Conglomerado	Cenozoico	Paleógeno	28834.13	3.72
Ti(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Cenozoico	Paleógeno	6980.03	0.90
Ti(lm-ar)	Sedimentaria	Limolita-Arenisca	Cenozoico	Paleógeno	52207.88	6.73
Tom(A)	Ígnea extrusiva	Andesita	Cenozoico	Terciario	32254.77	4.16
Tom(Ta)	Ígnea intrusiva	Toba Ácida	Cenozoico	Terciario	37533.81	4.84
Tom(Ti)	Ígnea intrusiva	Toba intermedia	Cenozoico	Terciario	522.77	0.07
Ts(ar-Ti)	Ígnea extrusiva	Arenisca-Toba intermedia	Cenozoico	Neógeno	918.95	0.12
Ts(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Cenozoico	Neógeno	605.45	0.08



El área de estudio presenta rocas que corresponden a cuatro eras geológicas: precámbrica, paleozoica, mesozoica y cenozoica. Así, las rocas más antiguas existentes en la cuenca datan de la era precámbrica, la más antigua de las eras, y abarcan el 14 % (108,883 ha) de la superficie de esta. Las rocas de esta era se formaron hace más de 580 millones de años, donde la corteza terrestre era muy frágil, delgada y con una enorme cantidad de movimientos provocados por terremotos y erupciones volcánicas. La roca tipo gneis, de clase metamórfica es el único tipo roca que data de esta era, y se encuentra distribuida en la parte oriente de la cuenca y abarca municipios como: Santiago Tlazoyaltepec, Santo Domingo Nuxaá y Santa María Peñoles.

Por otro lado, en el 13.3 % (103,504 ha) de la superficie de la cuenca, se encuentran rocas menos antiguas provenientes de la era paleozoica, caracterizada por la aparición de la atmósfera y la formación de rocas calizas. Estas rocas se formaron hace aproximadamente 250 millones de años, y entre ellas podemos encontrar dos tipos:

- Esquistos: roca metamórfica, cuyo origen fue en el interior de la corteza a partir del metamorfismo. Su puede ser de color gris, café, verde o amarillo. Los minerales que contiene la roca son: mica, clorita y talco. Tiene una densidad de 2 - 4 t m<sup>-3</sup> y una dureza de 2 - 7.5 Mhos. Este tipo roca se ubica en municipios al poniente de la cuenca como Santiago Juxtlahuaca y Putla Villa de Guerrero.
- Granito: roca de clase ígnea intrusiva cuya porosidad es muy baja y cuya densidad es de 2.6 – 2.8 t m<sup>-3</sup>. Tiende a tener un sistema de fractura en lugar de un sistema de poros. El granito tiene un porcentaje de absorción de entre 0.2 a 0.5, lo que significa que a pesar de que su sistema de fractura es más prominente que su porosidad, todavía está en el nivel inferior de rocas absorbentes. Este tipo de rocas se ubican en municipios como San Francisco Cahuaca y Santiago Yosunda.

Las rocas de mayor predominancia en la cuenca provienen de la era mesozoica y abarcan el 38.8 % (300,470 ha) de la superficie de esta; estas rocas tienen una antigüedad de más de 65 millones de años. Esta era se caracterizó por la unión de los continentes en uno solo (Pangea) y por el desarrollo evolutivo de los reptiles. En la cuenca encontramos 3 tipos de rocas que datan de esta era:

- Calizas: roca sedimentaria, compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). La dureza de la roca es 3 Mhos. Tiene una textura granular fina a gruesa y es un poco rasposa. La caliza es una roca que permite el paso del agua, es decir, es una roca permeable. La densidad global de esta roca es de 2.2 a 2.6 t m<sup>-3</sup>. Tiene una porosidad de 5 - 20 %. Entre los municipios donde se distribuyen este tipo de rocas se encuentran los



siguientes: Santiago Tilantongo, San Miguel Achiutla, Santa Lucía Monteverde, Santa Cruz Tacahua.

- Areniscas: roca de clase sedimentaria, compuesta principalmente de cuarzo y feldespatos de color blanco o amarillo. Tiene una textura de grano medio y puede contener agua, aceite o gas natural bajo tierra en sus espacios porosos. Tiene una densidad de 2 - 2.6 t m<sup>-3</sup> y una porosidad de 5 - 25 %. Se ubican en la zona norte del municipio Sola de Vega y Zimatlán de Álvarez.
- Conglomerados: Es una roca sedimentaria, con un color variable y un brillo opaco. Tiene una densidad de 2 - 2.4 ton m<sup>-3</sup> y una porosidad de 1 - 5 %. Este tipo de roca se puede encontrar en una parte del municipio de Santiago Yosundúa (2630 ha).

El 33.8 % (262,285 ha) de las rocas provienen de la era cenozoica, la más reciente de las eras. Esta era comenzó hace 65 millones de años y continúa hasta nuestros días, caracterizándose por presentar sedimentos sueltos, escasamente consolidados. En la cuenca encontramos 12 tipos de rocas que datan de esta era; a continuación se describen los tipos más abundantes:

- Limolita: roca sedimentaria que proviene de otras rocas, fragmentos o minerales que se depositan por gravedad. Su color es café o blanco. Tiene una densidad de 2 - 2.6 t m<sup>-3</sup> y una porosidad de 5 - 25 %. Se encuentra en municipios como: Santo Domingo Yanhuitlan, Magdalena Zahuatlán y San Francisco Chindúa al nor-orienté de la cuenca.
- Toba acida: roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos por los respiraderos durante una erupción volcánica. Se encuentra en municipios al sur-orienté de la cuenca como Zimatlán de Álvarez y Villa sola de Vega,
- Aluvial: son los suelos con menor antigüedad de la cuenca, ya que datan del sistema cuaternario, es decir hace 1.6 millones de años. Están formados de materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad. Son suelos muy anisotrópicos en su distribución, sus propiedades están estrechamente relacionadas con la granulometría. Su permeabilidad depende de su granulometría y generalmente presentan un nivel freático alto. Se encuentra en municipios como Santiago Tillo y San Andrés Sinaxtla.

En la Figura 11 se puede observar la distribución de los tipos de rocas en la cuenca. Las rocas calizas, el granito, gneis y el esquisto son las de mayor abundancia, con un 76 % de la superficie.

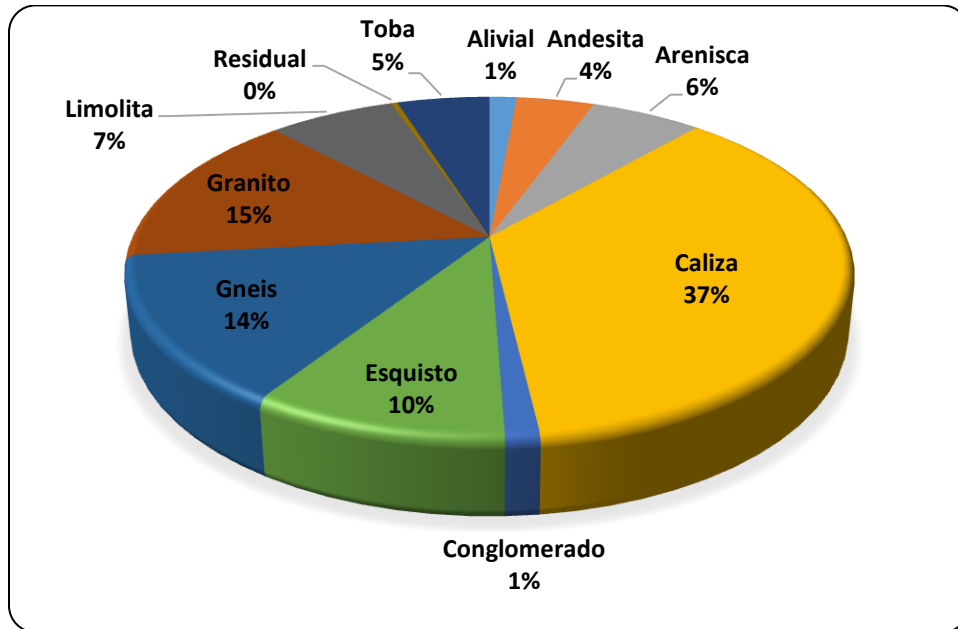


Figura 11. Distribución de los tipos de rocas dentro de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Por el origen de las rocas, el 51 % de la cuenca, está cubierta por rocas de tipo sedimentaria, las cuales se forman en la superficie de la tierra a partir de sedimentos que se compactan, presentándose frecuentemente en forma de capas o estratos, las cuales resultan de la meteorización y erosión de rocas preexistentes. El 24 % de la superficie de la cuenca se compone de rocas ígneas intrusivas, lo que quiere decir que son rocas que presentan una textura de tamaño de grano medio a gruesa debido a su enfriamiento lento. El 24 % se compone de metamórficas las cuales resultan de la recristalización de otras rocas (ígneas, sedimentarias o metamórficas) bajo la acción de cambio en la presión o temperatura. Las cuales se originan a partir de una roca que está sometida a altas presiones o temperatura o ambos factores a la vez (Figura 12 y Figura 13).

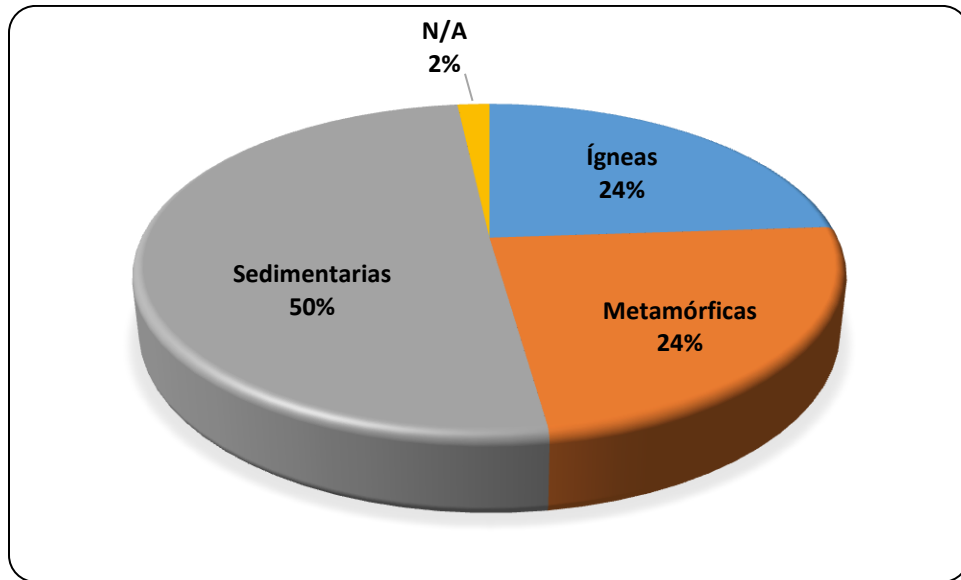


Figura 12. Distribución de los tipos de rocas por su origen.

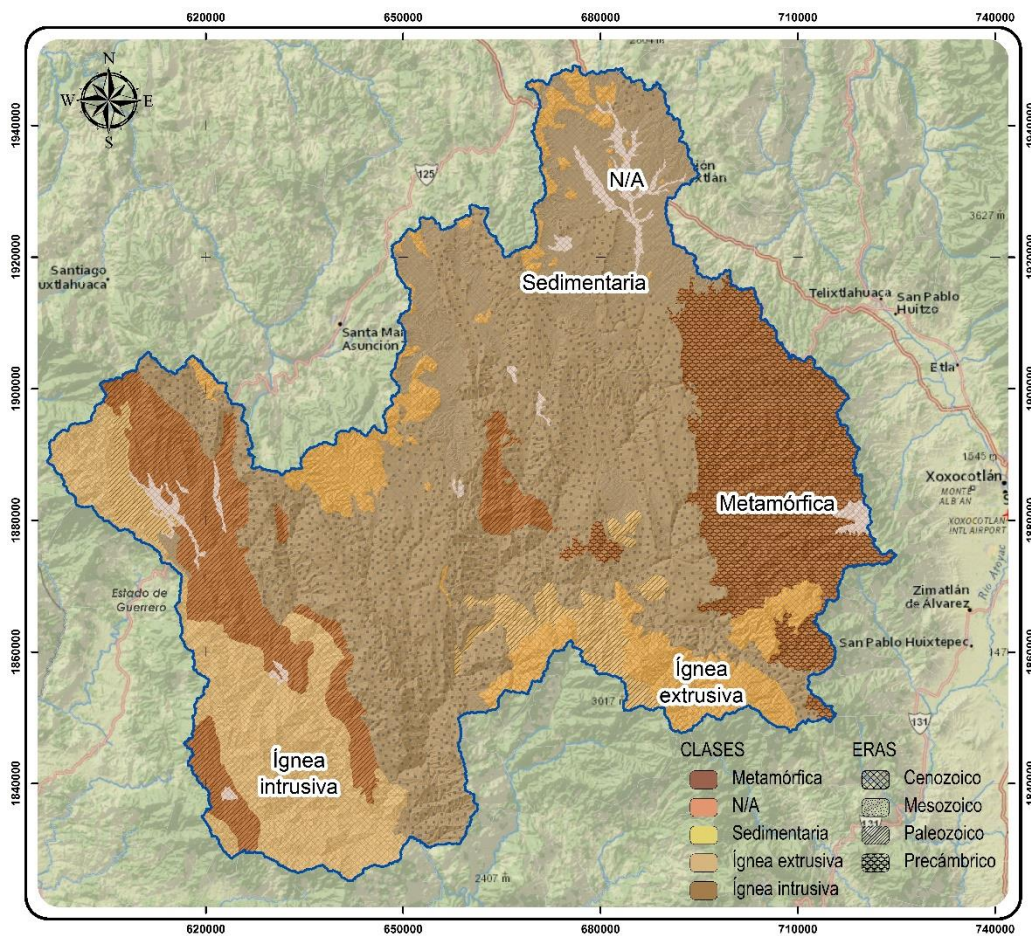


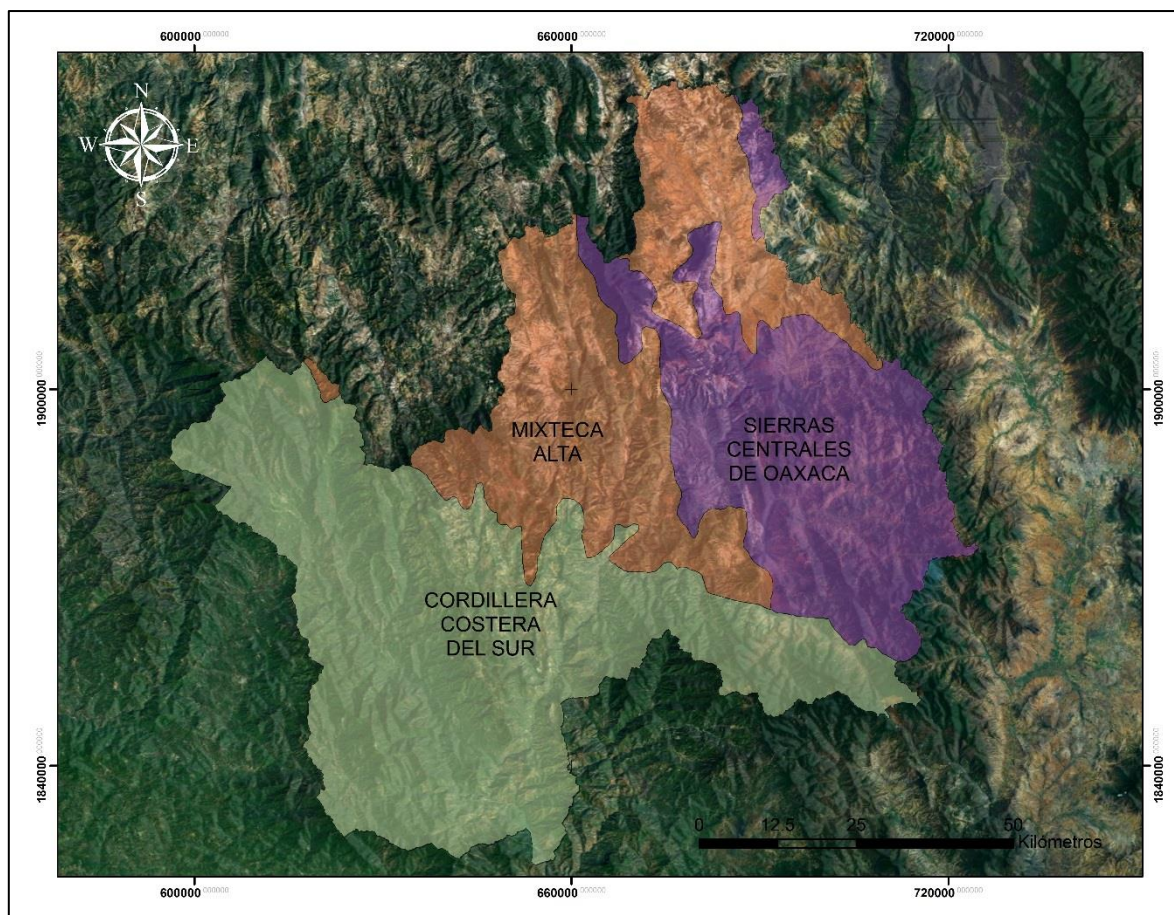
Figura 13. Distribución geográfica de los tipos de rocas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 2002).

### 5.1.4. Fisiografía

El relieve es la forma en que se presenta la superficie de tierra. En México es extraordinariamente variado y podemos encontrar desde cadenas montañosas hasta grandes planicies costeras pasando por valles, cañones, altiplanicies, depresiones, entre otras formaciones; las cuales se agrupan en provincias fisiográficas. Las provincias fisiográficas son regiones donde el relieve resulta de un mismo conjunto de agentes modeladores como geología, tipo de suelo y vegetación.

El área de estudio se localiza sobre la provincia de la Sierra Madre del sur, la cual se extiende paralela a la costa del pacífico con una dirección general de noroeste a suroeste. Su altitud es casi constante de poco más de 2,000 m y en ella nacen varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico y en su vertiente interior se localizan las cuencas de los ríos Balsas, Verde y Tehuantepec.

Específicamente, la cuenca está conformada por tres subprovincias fisiográficas: la cordillera costera del sur, la mixteca alta y sierras centrales de Oaxaca (Figura 14). La primera, localizada al suroeste de la cuenca, abarca una superficie de 360,264.74 ha (46.4 %); la segunda, ubicada al noroeste, abarca 199,872.79 ha (27.8 %); y la tercera, al este, que cubre una superficie de 215,973.38 ha (25.8 %).

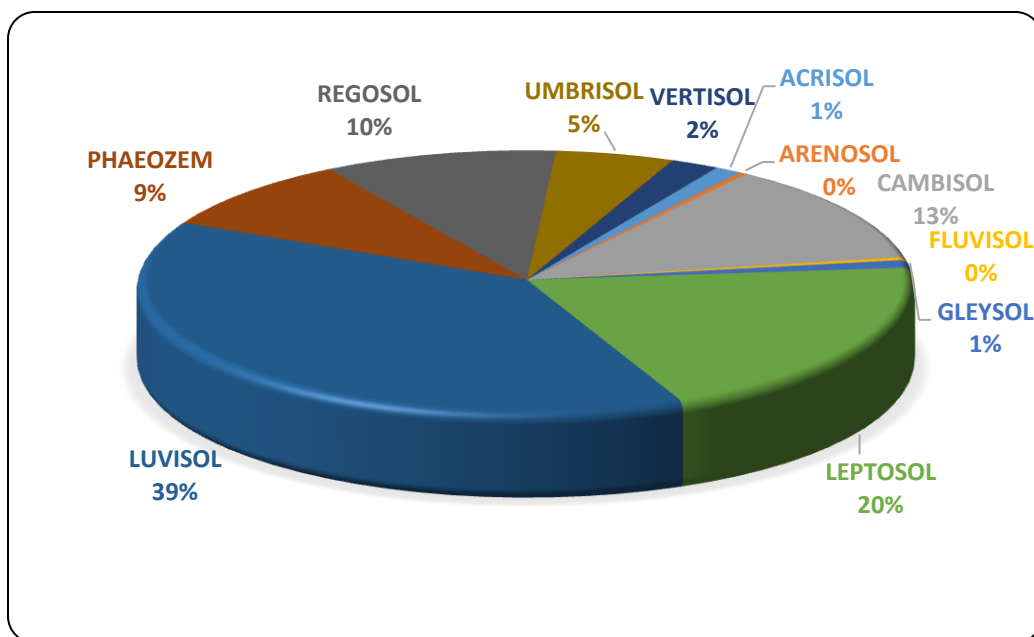


**Figura 14.** Subprovincias fisiográficas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 5.1.5. Suelos

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre, formada por rocas desintegradas por efectos del intemperismo; es un sistema complejo que se forma por la interacción continua y simultánea del clima, del tipo de vegetación, fauna y de las condiciones particulares del relieve.

De acuerdo con INEGI (2004), en la cuenca del río Sordo se presentan 10 grandes grupos de suelo (Figura 15): acrisol (1.14 %), arenosol (0.33 %), cambisol (12.41 %), fluvisol (0.36 %), gieysol (0.93 %), leptosol (19.97 %), luvisol (38.75 %), phaeozem (9.04 %), regosol (9.96 %) y vertisol (2.07 %).



**Figura 15.** Distribución de los suelos en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En el Cuadro 5 se pueden observar las 10 unidades de suelo y subunidad presentes en la superficie de la cuenca.

**Cuadro 5.** Unidades de suelos presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Clave	Suelo	Subunidad	Textura	Fase física	Área (ha)
AC	Acrisol	Hiperdístico	Media		8808.52
AR	Arenosol	N <sup>1</sup>	Gruesa		2547.48
CM	Cambisol	Calcárico	Fina		4693.51
CM	Cambisol	Crómico	Media		31441.41
CM	Cambisol	Dístico	Media		13636.86
CM	Cambisol	Eútrico	Fina		19607.81

<sup>1</sup> Ninguno



Clave	Suelo	Subunidad	Textura	Fase física	Área (ha)
CM	Cambisol	Húmico	Media		4206.16
CM	Cambisol	N	Media		22552.45
FL	Fluvisol	Eútrico	Gruesa	Pedregosa	1755.35
FL	Fluvisol	N	Gruesa	Pedregosa	1001.80
GL	Gleysol	N	Fina		4646.50
GL	Gleysol	Endostágnico	Fina		2574.13
LP	Leptosol	Calcárico	Media		19034.69
LP	Leptosol	Dístrico	Media		22509.50
LP	Leptosol	N	Media	Gravosa	113136.16
LV	Luvisol	Calcico	Fina		5938.74
LV	Luvisol	Crómico	Fina	Pedregosa	144814.75
LV	Luvisol	Cutánico	Media		26270.96
LV	Luvisol	Dístrico	Fina		53461.01
LV	Luvisol	Húmico	Media		3717.64
LV	Luvisol	N	Fina		12376.66
LV	Luvisol	Profúndico	Media		21820.12
LV	Luvisol	Ródico	Fina		19802.79
LV	Luvisol	Esquelético	Media		11354.38
LV	Luvisol	Umbrico	Fina		682.76
PH	Phaeozem	Calcárico	Media	Pedregosa	38625.17
PH	Phaeozem	Crómico	Media		6812.58
PH	Phaeozem	Húmico	Media		12834.98
PH	Phaeozem	Lúvico	Media		10385.72
PH	Phaeozem	N	Fina	Pedregosa	1375.49
RG	Regosol	Arénico	Gruesa		2504.03
RG	Regosol	Calcárico	Media		12403.46
RG	Regosol	Dístrico	Gruesa	Lítica	15648.66
RG	Regosol	Eutrico	Gruesa	Lítica	41058.38
RG	Regosol	N	Media	Pedregosa	5584.59
UM	Umbrisol	Hiperdístrico	Media		11388.56
UM	Umbrisol	Humico	Media		6381.66
UM	Umbrisol	N	Media		19932.75
UM	Umbrisol	Páquico	Media		1391.15
VR	Vertisol	Mázico	Fina		12529.13
VR	Vertisol	N	Fina		3469.69

Fuente: INEGI (2004).





A continuación se describen los cinco suelos más abundantes en la cuenca:

- Los luvisoles son suelos que presentan un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o claros, aunque también presentan tonos pardos o grises. Estos se encuentran en zonas llanas o suavemente inclinadas. La mayoría de los luvisoles son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas, sin embargo dado su alto contenido de limo son suelos susceptibles al deterioro de su estructura cuando se labran mojados con maquinaria pesada. Los luvisoles en pendientes fuertes requieren medidas de control de la erosión.
- Los leptosoles se caracterizan por su escasa profundidad (menor a 25 cm). Estos se ubican en zonas montañosas, debido a que las pendientes y la consecuente erosión imponen una restricción a la formación del suelo.
- Los cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollados que se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa que parece más suelo que roca, ya que en ella se forman terrones, además pueden presentar acumulación de algunos materiales como arcilla, carbonato de calcio, fierro, manganeso, etc. pero sin que esta acumulación sea muy abundante. Estos suelos son comunes en áreas con erosión geológica activa y en regiones templadas que estuvieron bajo la influencia de glaciaciones durante el pleistoceno. Los cambisoles generalmente constituyen buenas tierras agrícolas sin embargo en pendientes escarpadas es mejor conservarlos bajo bosque.
- Los regosoles son suelos generalmente muy jóvenes que resultan del depósito reciente de roca y arena acarreadas por el agua; de ahí que se encuentren sobre todo en sierras, donde se acumulan por los ríos que descienden de la montaña cargados de sedimentos. Las variantes (subunidades) más comunes en la cuenca son los regosoles éutricos y calcáricos, los cuales se caracterizan por estar recubiertos por una capa conocida como ócrica que al ser retirada la vegetación, se vuelve dura y costrosa impidiendo la penetración de agua hacia el subsuelo, lo que se vuelve un factor adverso para el establecimiento de las plantas. Esta combinación (poca cubierta vegetal y dificultad de penetración del agua al suelo) favorece la escorrentía superficial y con ello la erosión.
- Los phaeozems (feozem) se caracterizan por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Son de profundidad muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para agricultura de riego o temporal. Los menos profundos son los situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna fuerte cementación en el suelo,

tienen rendimientos más bajos que los más profundos y se erosionan con mayor facilidad.

En la Figura 16 se observa la distribución espacial de los suelos dentro de la cuenca. Se observa que en la región de Nochixtlan, es donde se encuentran los suelos vertisoles, los cuales se utilizan para agricultura.

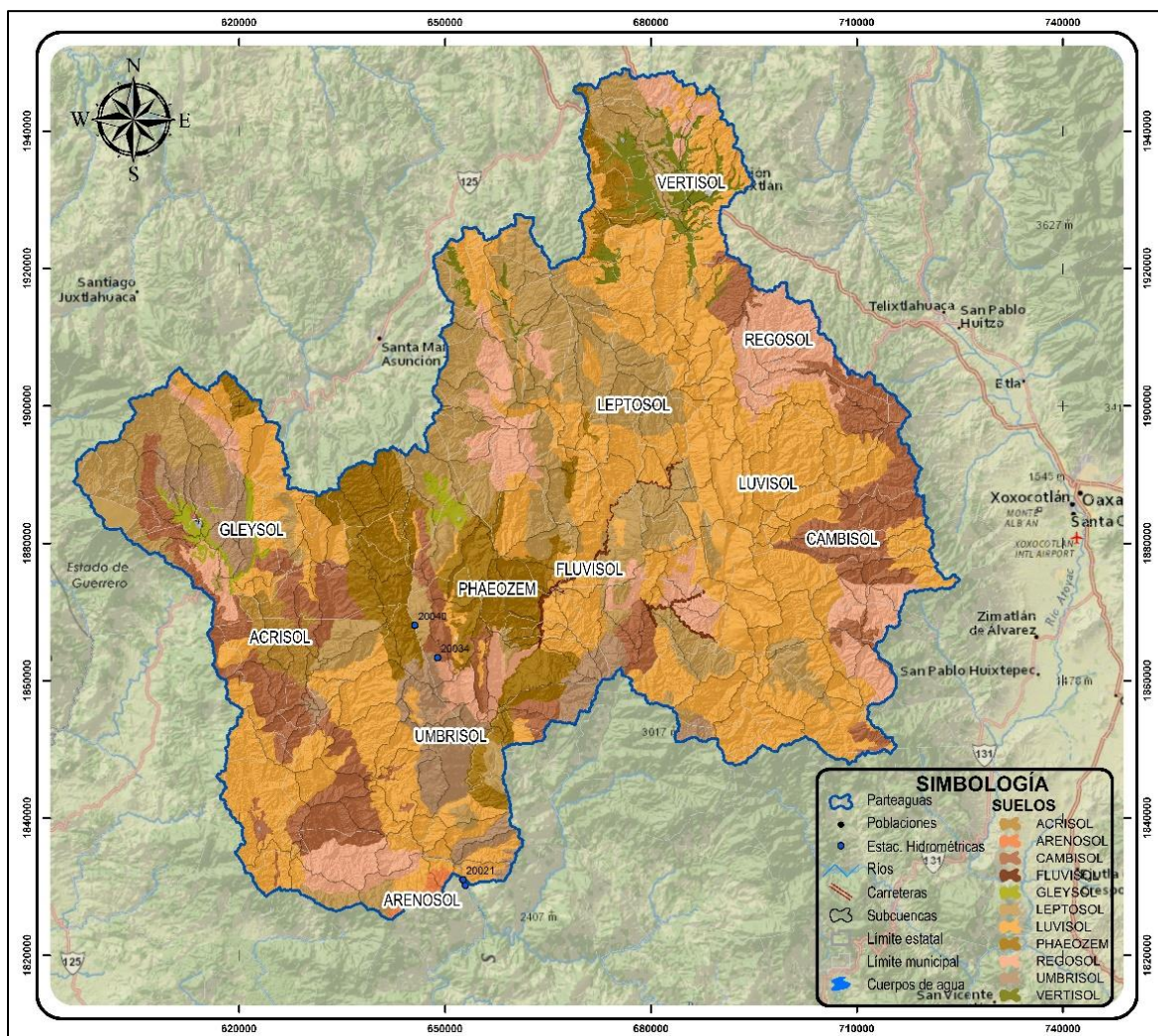


Figura 16. Suelos presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca (INEGI, 2004).

### 5.1.6. Uso de suelo y vegetación

Según la carta de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2014) la cuenca del río Sordo presenta 32 usos de suelo y vegetación. En el Cuadro 6, se detalla la superficie que abarca cada uno de estos.

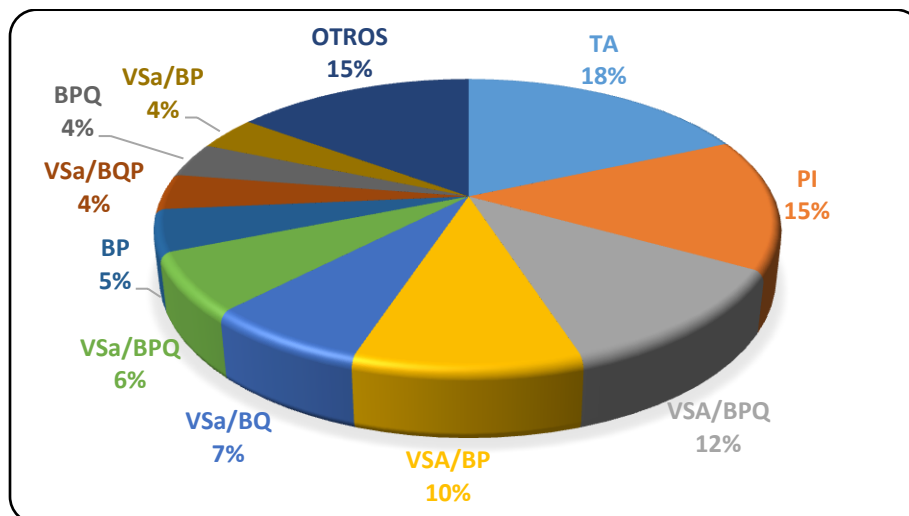
**Cuadro 6.** Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Clave	Descripción	Superficie	
		ha	%
RA	Agricultura de riego anual	7709.7	0.99
RAS	Agricultura de riego anual y semipermanente	3132.3	0.40
RS	Agricultura de riego semipermanente	1091.7	0.14
TA	Agricultura de temporal anual	142188.2	18.32
TAP	Agricultura de temporal anual y permanente	40.8	0.01
TAS	Agricultura de temporal anual y semipermanente	748.6	0.10
TP	Agricultura de temporal permanente	5240.0	0.68
AH	Asentamientos humanos	56.8	0.01
BQ	Bosque de encino	4056.7	0.52
BQP	Bosque de encino-pino	156.3	0.02
BP	Bosque de pino	36479.1	4.70
BPQ	Bosque de pino-encino	29838.3	3.84
BJ	Bosque de táscate	649.5	0.08
BM	Bosque mesófilo de montaña	4094.1	0.53
ML	Chaparral	4885.8	0.63
VPI	Palmar inducido	19624.9	2.53
PC	Pastizal cultivado	551.4	0.07
PI	Pastizal inducido	114822.6	14.79
VSI	Sabanoide	8548.5	1.10
VSA/BQ	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	20433.3	2.63
VSA/BQP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	5777.8	0.74
VSA/BP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	77941.5	10.04
VSA/BPQ	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	92420.6	11.91
VSA/BM	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	3832.6	0.49
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	55683.5	7.17
VSa/BQP	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	30908.5	3.98
VSa/BP	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	29166.5	3.76
VSa/BPQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	51364.1	6.62
VSa/BM	Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	9718.0	1.25
VSa/SBC	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	12612.6	1.63
VSa/SMS	Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia	8.3	0.00
ZU	Zona urbana	2328.5	0.30

Fuente: INEGI (2014)

En la siguiente gráfica se observa que la agricultura de temporal anual (TA), pastizal inducido (PI) y la vegetación secundaria arbórea de bosque de pino

encino (VSA/BPQ) son los principales usos de suelo y vegetación en la cuenca, con un 18.3, 14.7 y 11.9 % respectivamente ( Figura 17).



**Figura 17.** Distribución de las superficies que comprende cada uso de suelo y vegetación presentes en la cuenca (INEGI, 2014).

En la Figura 18, se puede observar la distribución espacial de los diferentes tipos de uso de uso y vegetación, por ejemplo la agricultura de temporal está ubicada en mayor medida en la parte centro y este de la cuenca.

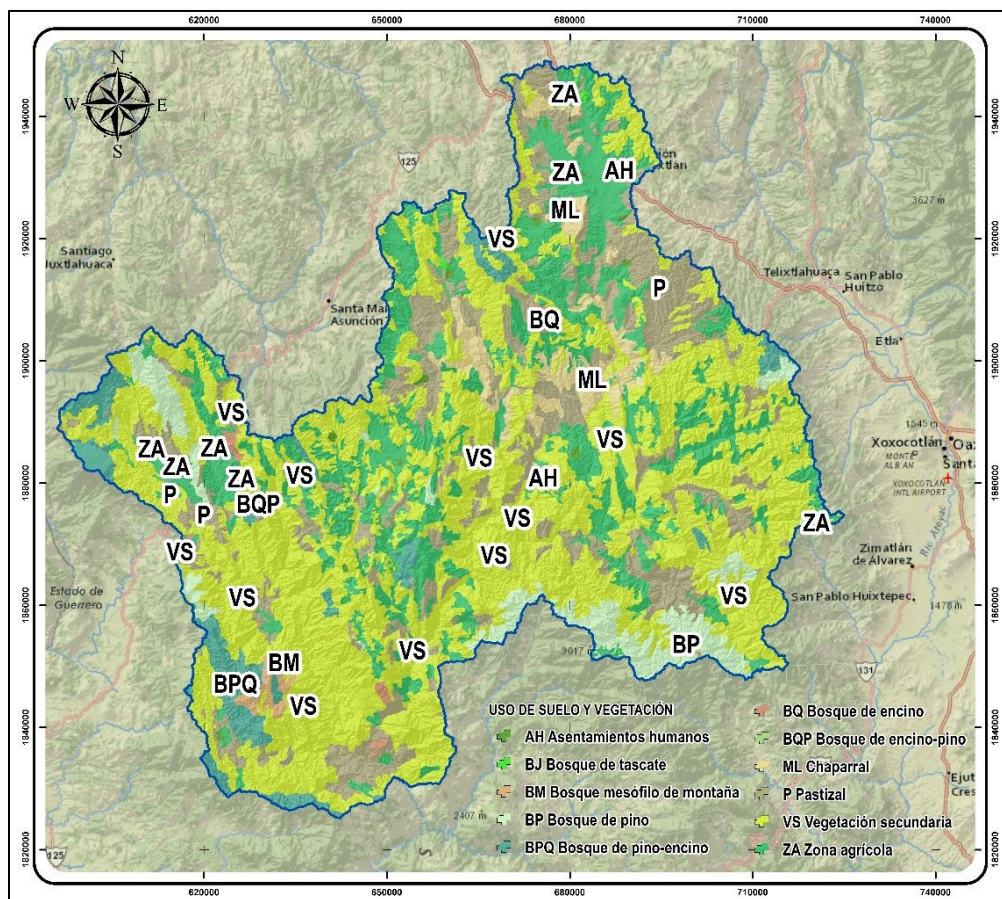


Figura 18. Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (INEGI, 2014).

### 5.1.7. Hidrología

La cuenca del río Sordo, según (CONAGUA, 2012), se ubica dentro de la región hidrológica No. 20, Costa Chica de Guerrero, y dentro de la región hidrológico administrativa V, Pacífico Sur.

En la cuenca de estudio confluyen varios ríos como el río Peñoles, La Labor, La Cuchara, Zapote, Yolotepec y el Sordo, entre otros. De estos ríos el principal es el Sordo-Yolotepec, que desemboca en la estación hidrométrica Ixtlayutla (20,021); donde se cerró la cuenca para este estudio.

Las bases de datos climáticas ERIC (2009) y CLICOM (2015) reportan para la cuenca 32 estaciones meteorológicas con información diaria de precipitación y temperatura. De igual manera, de acuerdo con BANDAS (2008) en la cuenca existen tres estaciones hidrométricas (Figura 19).

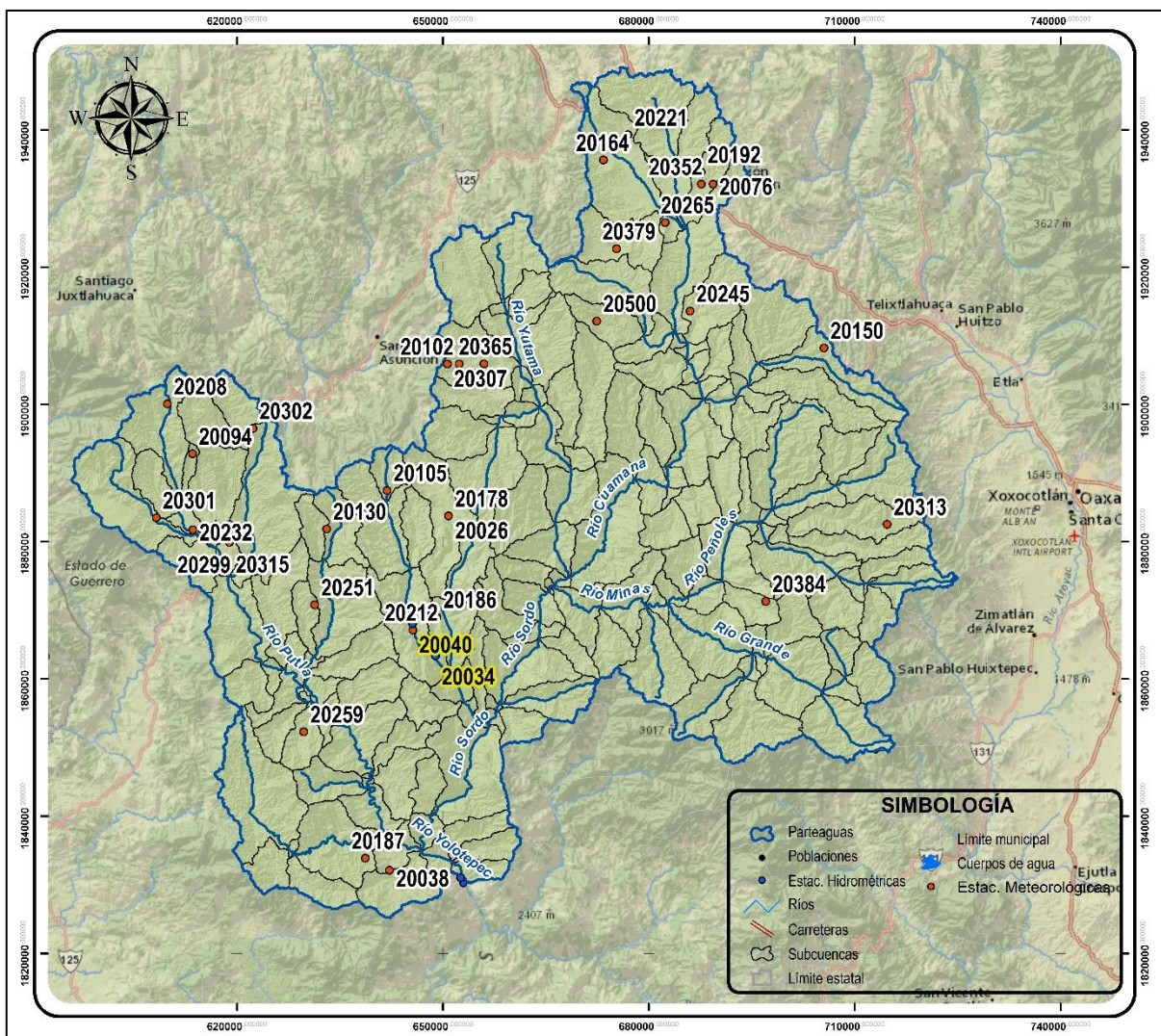


Figura 19. Localización de las estaciones hidrométricas y meteorológicas presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En el Cuadro 7 se detalla la localización, corriente principal y periodo de datos hidrométricos con que cuenta cada estación hidrométrica.

Cuadro 7. Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Clave	Periodo	Estación	Corriente	RH	X (m)	Y (m)
20021	1961-1985, 1987-1991	Ixtayutla	Yolotepec	20	652587.71	1831045.26
20034	1954-1967	Nduave	La Esmeralda	20	648902.00	1863375.00
20040	1960-1969	Yutama	Yutama	20	645571.58	1868072.33

Fuente: BANDAS, 2008.

La estación hidrométrica Ixtayutla, se encuentra situada en el municipio de Santiago Ixtayutla del estado de Oaxaca, a unos 10 km al Oriente de la población de Ixtayutla y 8 km aguas arriba de la confluencia de los ríos Yolotepec y Verde.

Cabe mencionar que esta estación dejó de operar en 1991 y en consecuencia se encuentra en muy malas condiciones (Figura 20).



Figura 20. Vista aguas arriba y aguas abajo del río Yolotepec desde la estación hidrométrica 20,021 Ixtlayutla.

En el Cuadro 8 se presenta la localización, altitud y periodo de información para cada estación meteorológica. Es importante mencionar que algunas estaciones se descartaron, debido a la poca disponibilidad de información (menor a 10 años).

**Cuadro 8.** Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Clave	Nombre	Periodo		Compl (%) <sup>*</sup>	Coordenadas		Altitud (m)
		Primer	Último		X (m)	Y (m)	
20038	Santiago Ixtayutla	03/1961	08/2006	70.5	642221.44	1832127.22	510
20187	Yutacua, Stgo. Ixtayutla	01/1972	12/2000	65.8	638688.60	1833874.45	355
20259	Zacatepec, Zacatepec SMN	03/1975	11/1986	96.9	629720.13	1852296.21	900
20212	Yutama, Yosondua (CFE)	02/1960	04/1969	100.0	645609.45	1867116.52	2064
20186	Santiago Yosondua, Stgo.Y.	07/1957	02/1991	89.8	649111.75	1869022.25	2000
20251	E.T.A. 199 Jamiltepec	04/1975	11/1980	66.8	631310.62	1870784.38	17
20384	San Antonio Huitepec	10/1982	02/1996	76.5	697035.09	1871299.05	2375
20299	Paraje Pérez, San Juan C.	01/1980	08/1988	77.3	618903.38	1879893.93	1103
20315	Yukukimi, Tezoatlán	12/1979	04/1987	81.1	618903.38	1879893.93	1968
20232	Putla, Villa de Guerrero	03/1974	12/1989	93.3	613570.17	1881745.17	730
20130	Sta. María Yucuhiti	05/1960	12/2000	74.3	633050.85	1881860.46	1200
20313	Tlazolyatepec (DGE)	02/1980	11/2005	62.0	714713.65	1882542.03	2400
20301	Río Venado, C.del Rosario	12/1979	05/1985	71.2	608238.55	1883487.07	984
20026	Chalcatongo de Hidalgo	07/1957	02/2004	99.4	650816.47	1883752.03	2250
20178	Villa Chalcatongo, (CFE)	01/1961	12/2000	75.4	650816.47	1883752.03	2327
20105	San Esteban Atatlahuaca	01/1961	10/1995	75.0	641848.99	1887451.28	2235
20094	Putla de Guerrero, (CFE)	08/1961	06/2000	93.5	613509.69	1892809.34	740
20302	San Andrés Chicahuaxtla	02/1979	04/2000	67.4	622318.76	1896510.91	2433

Clave	Nombre	Periodo		Compl	Coordenadas		Altitud
20208	San Juan Copala, (DGE)	12/1972	06/1985	64.2	609853.54	1900092.17	1608
20307	San Martín Itunyoso (DGE)	09/1980	02/1996	84.4	650655.20	1905882.95	2475
20102	San Agustín Tlacotepec	07/1958	12/1988	91.7	652356.61	1905895.49	1990
20365	Magdalena Peñasco	01/1982	06/1992	81.7	655972.14	1905922.60	1929
20150	Tejocotes, Stgo. Tenango	10/1953	12. 2CC6	76.8	705512.38	1908239.93	2500
20500	Tilantongo, Tilantongo	10/1983	12/2005	29.2	672404.15	1912140.82	2250
20245	Jaltepec, Nochixtlan	02/1976	12/2005	43.3	686000.73	1913587.91	2167
20379	Yodocono de Porfirio	01/1982	11/2005	60.0	675290.74	1922679.42	2310
20265	Etlatongo, San Mateo Etl.	10/1975	12/2005	69.6	682376.60	1926504.73	2033
20076	Asuncion Nochixtlán (SMN)	01/1926	01/2006	57.6	689337.20	1932102.57	2111
20164	Sta. María Tiltepec, SMN	01/1961	03/1996	73.3	673373.66	1935611.99	2500
20221	Cam. Agr. Exp. Yanhuitlán	02/1964	03/1983	87.7	676952.24	1939295.35	2250

Fuente: ERIC (2009).

## 5.2. Caracterización morfométrica de la cuenca

Para la caracterización morfométrica de la cuenca, se hizo un análisis cuantitativo de las características físicas de la cuenca (área, pendiente, longitud del cauce, entre otras) con la finalidad de tener parámetros que permitan interpretar los fenómenos hidrológicos que ocurren en ésta.

### 5.2.1. Parámetros de forma

#### 5.2.1.1. Área

El área de la cuenca es la superficie delimitada por la proyección horizontal del parteaguas. El área se obtuvo con el modelo SWAT, para ArcGis 10, y el modelo digital de elevaciones del INEGI (2014); resultando un área de  $7,751.42 \text{ km}^2$ . La cuenca de estudio, según Campos (1992), se clasifica como una cuenca muy grande (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Clasificación propuesta para el tamaño de cuencas (Campos, 1992).

Tamaño de la cuenca ( $\text{km}^2$ )	Descripción
Menos de 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia pequeña
500 a 2,500	Intermedia grande
2500 a 5,000	Grande
Más de 5,000	Muy grande





### 5.2.1.2. Índice de forma

Uno de los índices más utilizados para medir la forma de la cuenca, es el factor o relación de forma de Horton (1945), donde relaciona el área de la cuenca y la longitud de la misma. En este sentido, valores inferiores a la unidad indican cuencas alargadas y aquellos cercanos a uno, son redondeadas (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Valores interpretativos del factor forma de Horton (1945).

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
< 1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Bell (1999)

Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Rf = A / L_a^2 \dots\dots\dots \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

$Rf$  = Factor de forma de Horton (adim.)

$A$  = Área de la cuenca ( $km^2$ )

$L_a$  = Longitud axial (km)

Sustituyendo los valores característicos de la cuenca, se obtuvo:

$$Rf = \frac{7,751.42km^2}{(187.31km)^2} = 0.22$$

El factor de forma de la cuenca del río Sordo es de 0.22 lo que indica que la forma de la cuenca es alargada, por lo que no es propensa a presentar crecidas súbitas ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más largo que en cuencas ensanchadas, contribuyendo a que los picos de crecidas sean menos súbitos en caso que se presenten lluvias intensas, presentando un hidrograma parecido al siguiente:

### HIDROGRAMA DE CRECIDA

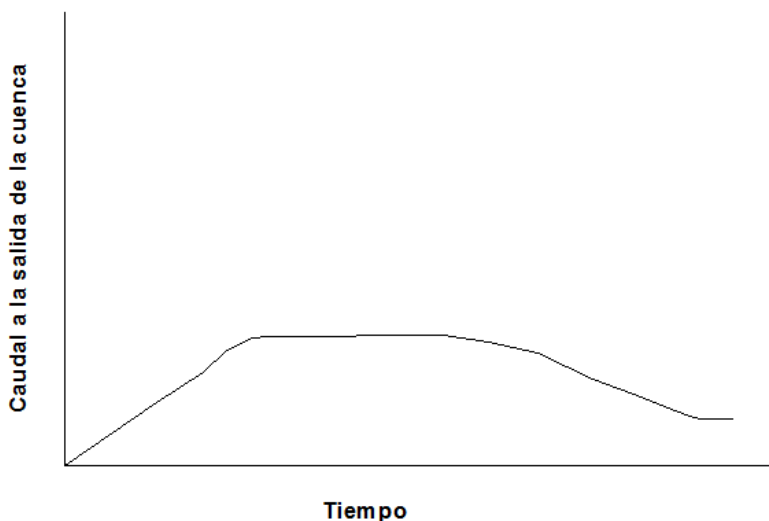


Figura 21. Hidrograma de crecida para eventos máximos de precipitación para cuencas alargadas, (Bell, 1999).

#### 5.2.1.3. Proporción de elongación

Es la relación entre el diámetro de un círculo, con igual área que la de la cuenca, y la longitud máxima de la misma.

Este parámetro se estimó empleando la ecuación propuesta por Shumm (1956):

$$Re = 1.128\sqrt{A}/Lc \dots\dots\dots\text{Ecuación (12)}$$

Donde:

*Re* = Relación de elongación

*Lc* = Longitud del cauce principal de la cuenca (km)

*A* = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtuvo que el índice propuesto por Shumm es de 0.53, lo que implica una cuenca alargada en áreas con relieve y pendientes pronunciadas.

$$Re = \frac{1.128\sqrt{A}}{Lc} = \frac{1.128\sqrt{7,751.42\text{km}^2}}{187.31\text{km}} = 0.53$$

#### 5.2.1.4. Relación de circularidad



El índice de circularidad de Miller, compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. Este varía entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que unos coeficientes de circularidad cercanos a 0, indican cuencas alargadas.

Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Rc = 4\pi \left( \frac{A}{P^2} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

- $Rc$  = Relación de circularidad (adim)
- $A$  = Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )
- $P$  = Perímetro de la cuenca (km)

Sustituyendo valores, tenemos:

$$Rc = 4\pi \frac{A}{P^2} = \frac{7,751.42 \text{km}^2}{(825.27 \text{km})^2} = 0.14$$

Un coeficiente de circularidad de 0.14, valor alejado de uno, indica que la cuenca no posee similitud geométrica con el círculo, por lo tanto va a tener un comportamiento poco torrencial.

## 5.2.2. Parámetros fisiográficos y de relieve

### 5.2.2.1. Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad representa la relación entre el perímetro de la cueca y una circunferencia de igual área a la cuenca. Este índice se estimó a través de la siguiente ecuación:

$$kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

- $Kc$  = Coeficiente de compacidad de Gravelius (adim.)
- $P$  = Perímetro de la cuenca (km)
- $A$  = Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

Este valor adimensional, independiente del área estudiada, tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Los valores de  $Kc$  nunca serán inferiores a 1.



Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similitud que guarda con formas redondas.

**Cuadro 11.** Formas de la cuenca según su coeficiente de compacidad (FAO, 1985)

Clase	Kc	Forma
Kc <sub>1</sub>	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda
Kc <sub>2</sub>	1.25 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga
Kc <sub>3</sub>	1.50 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
Kc <sub>4</sub>	< 1.75	Rectangular oblonga

Sustituyendo la ecuación, se obtuvo:

$$k_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 \frac{825.27 \text{ km}}{\sqrt{7,751.42 \text{ km}^2}} = 2.62$$

El coeficiente de compacidad que presenta la cuenca es 2.62, el cual indica, de acuerdo con la clasificación de la FAO, una cuenca con forma rectangular oblonga.

### 5.2.2.2. Pendiente del cauce principal

Con este parámetro se obtiene la pendiente media del río, la cual nos indica el potencial erosivo de la cuenca. Se expresa con “S<sub>c</sub>” y se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_c = (H/L) * 100 \dots\dots\dots \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

Sc = Pendiente media del cauce (%)

H = Desnivel en el cauce principal (m)

L = Longitud total del cauce principal (m)

Sustituyendo datos, en la ecuación anterior, se obtuvo una pendiente media del cauce principal de 1.12 %.

### 5.2.2.3. Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca es uno de los principales parámetros que caracteriza su relieve y permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie.



La pendiente media de la cuenca se calculó por el método de Alvord, el cual se muestra a continuación:

$$S_{cuenca} = \left[ \frac{(\sum li * eq)}{A} \right] * 100 \dots\dots\dots \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

$S_{cuenca}$  = Pendiente media de la cuenca (%)

$\sum li$  = Sumatoria de las longitudes de las curvas de nivel (km)

$Eq$  = Equidistancia entre curvas (km)

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Sustituyendo datos en la ecuación anterior resulta una pendiente media de la cuenca de 38.79 %, lo que indica un relieve escarpado (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Características cualitativas del relieve de una cuenca según su pendiente (Pérez, 1979).

Pendiente media (%)	Relieve
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

#### 5.2.2.4. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una forma conveniente y objetiva para describir en forma estandarizada o relativa la distribución que guardan las elevaciones y áreas acumulativas de una cuenca. Las diferencias en las curvas hipsométricas, entre paisajes, surgen porque los procesos geomorfológicos que conforman el mismo suelen ser diferentes.

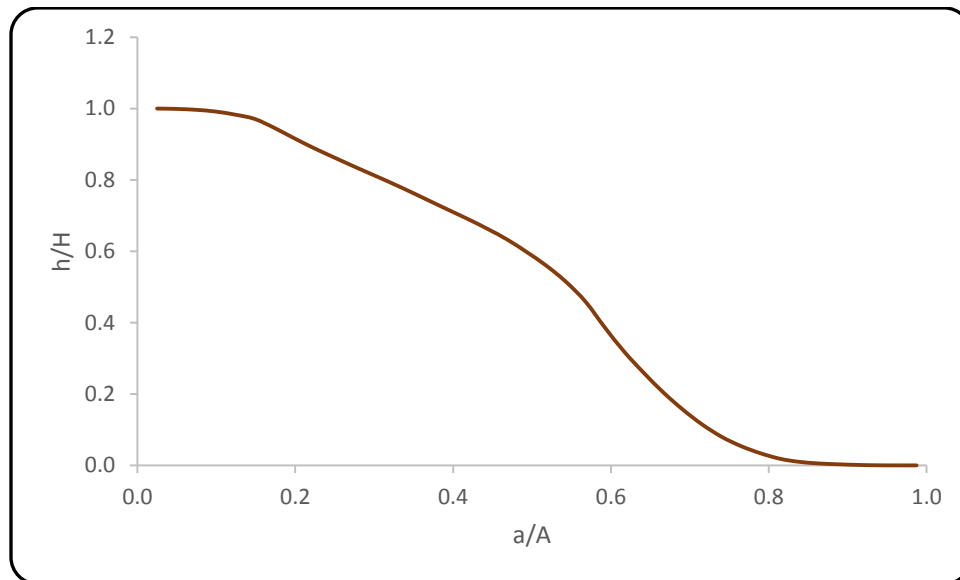
Con el propósito de comparar la cuenca con otros sistemas hidrográficos se empleó el criterio propuesto por Campos (1999) que considera la relación entre las alturas parciales y la altura total, así como las áreas parciales entre curvas de nivel y el área total.

**Cuadro 13.** Cálculo de la curva hipsométrica para la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

No.	Cotas		Desnivel h (m)	Área entre curvas (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área complementaria "a" (km <sup>2</sup> )	Área entre curvas (%)	Área acumulada (%)	a/A	h/H
	Min	Max								
1	241	318	77	1.20	1.20	7750.22	0.02	0.02	1.000	0.02



No.	Cotas		Desnivel h (m)	Área entre curvas	Área acumulada	Área complementaria	Área entre	Área acumulada	a/A	h/H
2	319	396	154	7.62	8.83	7742.59	0.10	0.11	0.999	0.05
3	397	474	231	19.76	28.59	7722.83	0.25	0.37	0.996	0.07
4	475	551	307	37.02	65.61	7685.81	0.48	0.85	0.992	0.10
5	552	629	384	67.46	133.07	7618.35	0.87	1.72	0.983	0.12
6	630	707	461	92.85	225.93	7525.50	1.20	2.91	0.971	0.15
7	708	784	537	189.73	415.66	7335.76	2.45	5.36	0.946	0.17
8	785	862	614	221.55	637.20	7114.22	2.86	8.22	0.918	0.20
9	863	940	691	213.06	850.27	6901.16	2.75	10.97	0.890	0.22
10	941	1017	767	194.16	1044.42	6707.00	2.50	13.47	0.865	0.25
11	1018	1095	844	193.00	1237.42	6514.00	2.49	15.96	0.840	0.27
12	1096	1173	921	188.23	1425.65	6325.77	2.43	18.39	0.816	0.30
13	1174	1250	997	184.56	1610.22	6141.21	2.38	20.77	0.792	0.32
14	1251	1328	1074	196.37	1806.59	5944.84	2.53	23.31	0.767	0.35
15	1329	1406	1151	202.76	2009.34	5742.08	2.62	25.92	0.741	0.37
16	1407	1483	1227	199.60	2208.94	5542.48	2.57	28.50	0.715	0.39
17	1484	1561	1304	200.24	2409.18	5342.24	2.58	31.08	0.689	0.42
18	1562	1639	1381	212.79	2621.97	5129.45	2.75	33.83	0.662	0.44
19	1640	1716	1457	228.21	2850.17	4901.25	2.94	36.77	0.632	0.47
20	1717	1794	1534	272.11	3122.28	4629.14	3.51	40.28	0.597	0.49
21	1795	1872	1611	295.96	3418.24	4333.18	3.82	44.10	0.559	0.52
22	1873	1949	1687	344.75	3762.99	3988.43	4.45	48.55	0.515	0.54
23	1950	2027	1764	430.88	4193.87	3557.55	5.56	54.10	0.459	0.57
24	2028	2105	1841	566.55	4760.42	2991.00	7.31	61.41	0.386	0.59
25	2106	2182	1917	524.21	5284.63	2466.79	6.76	68.18	0.318	0.62
26	2183	2260	1994	459.07	5743.70	2007.72	5.92	74.10	0.259	0.64
27	2261	2338	2071	424.59	6168.29	1583.13	5.48	79.58	0.204	0.67
28	2339	2415	2147	368.81	6537.10	1214.32	4.76	84.33	0.157	0.69
29	2416	2493	2224	327.16	6864.26	887.16	4.22	88.55	0.114	0.72
30	2494	2571	2301	267.96	7132.22	619.20	3.46	92.01	0.080	0.74
31	2572	2648	2377	201.17	7333.39	418.03	2.60	94.61	0.054	0.77
32	2649	2726	2454	155.76	7489.16	262.26	2.01	96.62	0.034	0.79
33	2727	2804	2531	119.63	7608.78	142.64	1.54	98.16	0.018	0.81
34	2805	2881	2607	66.44	7675.22	76.20	0.86	99.02	0.010	0.84
35	2882	2959	2684	34.57	7709.79	41.63	0.45	99.46	0.005	0.86
36	2960	3037	2761	18.10	7727.89	23.53	0.23	99.70	0.003	0.89
37	3038	3114	2837	13.75	7741.64	9.78	0.18	99.87	0.001	0.91
38	3115	3192	2914	7.87	7749.51	1.91	0.10	99.98	0.000	0.94
39	3193	3270	2991	1.68	7751.18	0.24	0.02	100.00	0.000	0.96
40	3271	3348	3068	0.24	7751.42	0.00	0.00	100.00	0.000	0.99



**Figura 22.** Curva hipsométrica de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Con base en el análisis hipsométrico, podemos determinar que la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca es juvenil la cual pertenece a una etapa de desequilibrio.

### 5.2.3. Parámetros de drenaje

#### 5.2.3.1. Orden de corrientes

Este parámetro refleja el grado de ramificación del cauce principal dentro de la cuenca. Horton (1945) clasificó en tres el orden de las corrientes, asignando el orden “1” a las más pequeñas, aquellas que no están ramificadas; el “2”, a las que tienen ramificaciones o tributarios de primer orden; el “3”, aquellas con dos o más tributarios de orden dos o menor. Por lo tanto, el orden de la corriente principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca.

La jerarquización de los cauces dentro de la cuenca se efectuó con la herramienta *stream order* de la extensión *Spatial Analyst* en arcgis 10, tomando como dato de entrada la red de drenaje escala 1:50,000 obtenida del INEGI y utilizando el método de Strahler. Después del análisis se obtuvo que la cuenca tiene un orden seis, lo cual indica la magnitud de la ramificación y extensión de la red de drenaje dentro de esta cuenca (Figura 23).

**Cuadro 14.** Número de corrientes de la cuenca, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Orden de corriente	No. de corrientes
1	417

2	201
3	97
4	83
5	8
6	1
<b>TOTAL</b>	<b>807</b>

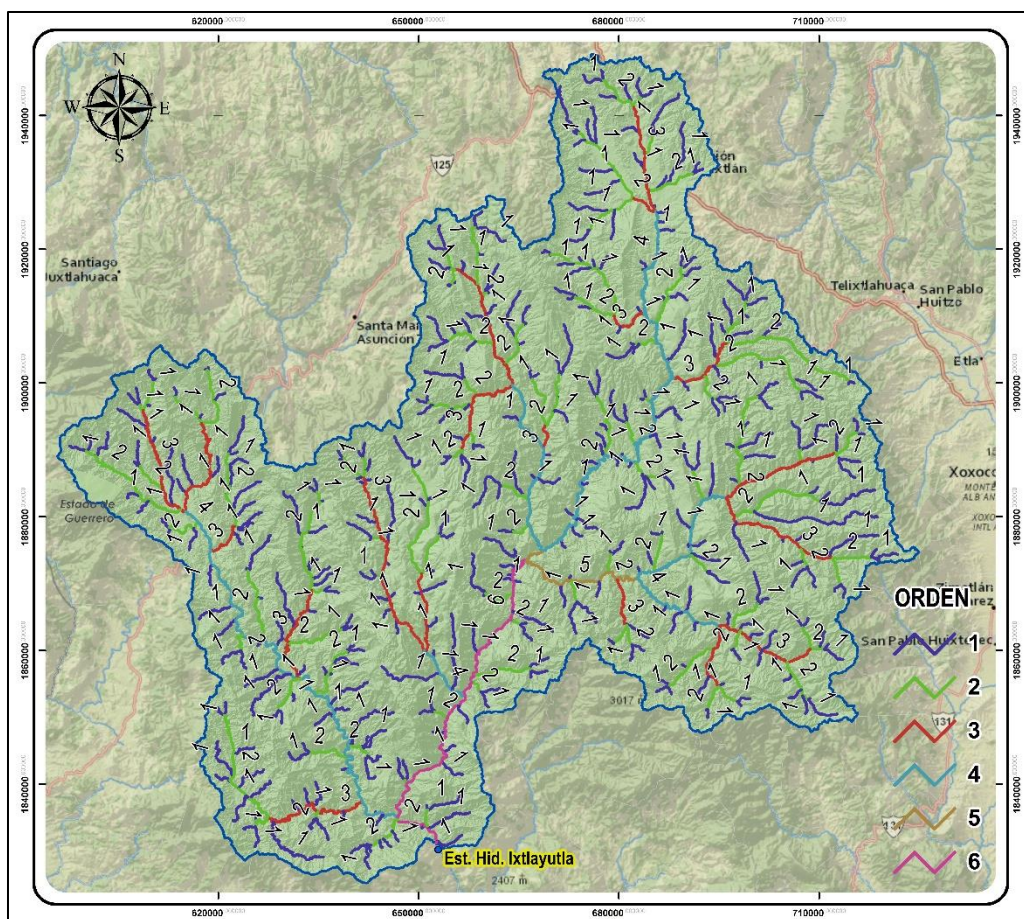


Figura 23. Orden de las corrientes por el método de Strahler, cuenca del río Sordo, Oaxaca México.

### 5.2.3.2. Relación de bifurcación (Horton/Strahler)

Este parámetro relaciona el número de cauces, de un orden dado, con el número de cauces del siguiente orden. El valor teórico mínimo de la relación es 2 con rango típico entre 3 y 5 para cuencas maduras, donde la estructura geológica no distorsiona el patrón de drenaje natural.

La relación de bifurcación se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Rb = N_n / N_{n+1} \dots\dots\dots \text{Ecuación (17)}$$





Donde:

$R_b$  : Relación de bifurcación

$N_n$  : Número de cauces de orden n

$N_{n+1}$  : Número de cauces de orden n+1

**Cuadro 15.** Cálculo de la relación de bifurcación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Orden de corriente	No. de corrientes	Longitud total (km)	Rb
1	417	1290.99	2.07
2	201	631.58	2.07
3	97	311.06	1.17
4	83	258.49	10.38
5	8	28.32	8.00
6	1	65.29	
<b>Total/promedio</b>	<b>807</b>	<b>2585.72</b>	<b>4.74</b>

Como se observa en el Cuadro 15, la cuenca presenta relaciones de bifurcación fuera de los rangos establecidos, por la ley de bifurcación, para cuencas maduras. Esto indica que en la cuenca seguirá actuando la erosión e irán apareciendo nuevos cauces.

### 5.2.3.3. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje ( $D_d$ ), otra propiedad fundamental de una cuenca, que define la longitud media de curso por unidad de superficie. Su magnitud indica la eficiencia de drenaje y el estado erosivo de la cuenca.

Para el cálculo de la densidad de drenaje se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_d = \sum L / A \dots\dots\dots \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

$D_d$  : Densidad de drenaje ( $\text{km km}^{-2}$ )

$\sum L$  : Suma de las longitudes de los cauces que integran la cuenca (km)

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

Para el análisis se utilizó la red hidrográfica, escala 1:20,000 elaborada a partir del MDE (modelo digital de elevaciones), y las microcuencas que conforman la cuenca. La metodología seguida, usando Arcgis 10, se detalla en el Anexo 10.1.9.

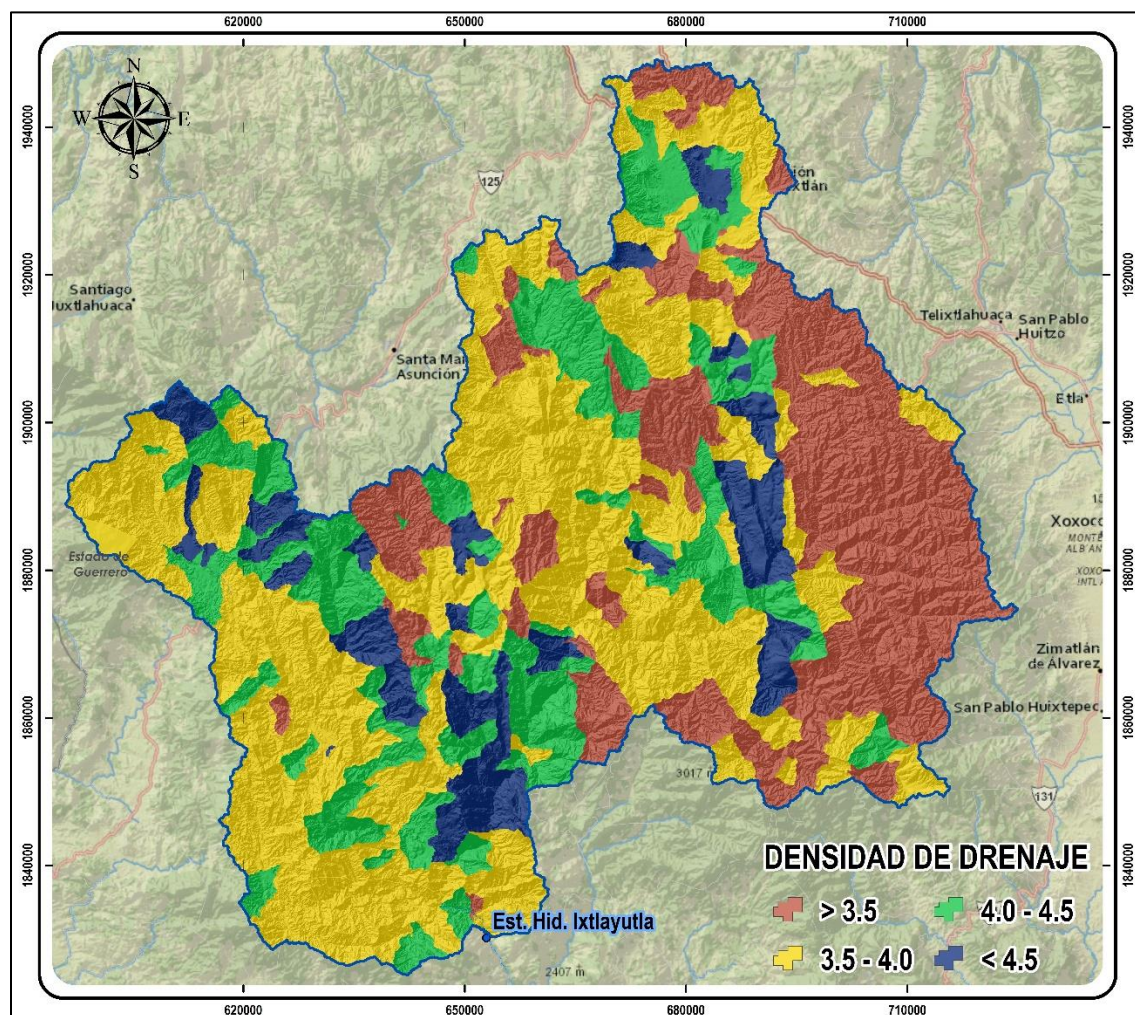


Figura 24. Densidad de drenaje de la cuenca río Sordo, Oaxaca, México.

Como se observa, la cuenca del río Sordo tiene en su mayoría áreas con densidad de drenaje superior a  $3.5 \text{ km km}^{-2}$ , lo que indica una cuenca bien drenada, compuesta de materiales erosionables, suelos poco permeables, pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal. Todo ello genera poca oportunidad al escurrimiento superficial de infiltrarse, propensión a generar crecidas súbitas y escasa percolación a nivel subterráneo.

### 5.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca

#### 5.3.1. Grado de marginación



Según el Consejo Nacional de Población (CONAPO), la marginación es un fenómeno estructural que excluye a ciertos grupos sociales del desarrollo y del disfrute de sus beneficios debido a una dificultad para propagar el progreso técnico al interior de la estructura productiva y en las regiones. La marginación implica la existencia de una precaria, estructura de oportunidades sociales para las personas que los expone a privaciones, riesgos y vulnerabilidades sociales cuya reversión es imposible por parte de las personas que las sufren, razón por la cual requiere el concurso activo de los agentes públicos, privados y sociales. La población marginada no sólo es pobre, también carece de los elementos mínimos para salir delante de esa situación de exclusión en que se encuentra.

El grado de marginación es una medida de corte analítico-descriptivo y resulta de estratificar el índice de marginación en cinco intervalos que agrupan los municipios por la semejanza de sus índices y las carencias que padecen.

Dependiendo del intervalo en que se ubique el valor del índice de marginación, el grado de marginación de los municipios, se clasifica en: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy alto (CONABIO, 2010).

La cuenca del río Sordo, según CONABIO (2010), presenta 48 municipios con muy alto grado de marginación, los cuales abarcan una superficie de 484,035.31 ha y una población de 228090 habitantes; 25 municipios con alto grado de marginación, mismos que comprenden una superficie de 145,751.98 ha; y 38 municipios con un grado de marginación medio, quienes cubren una superficie de 146,323.62 ha.

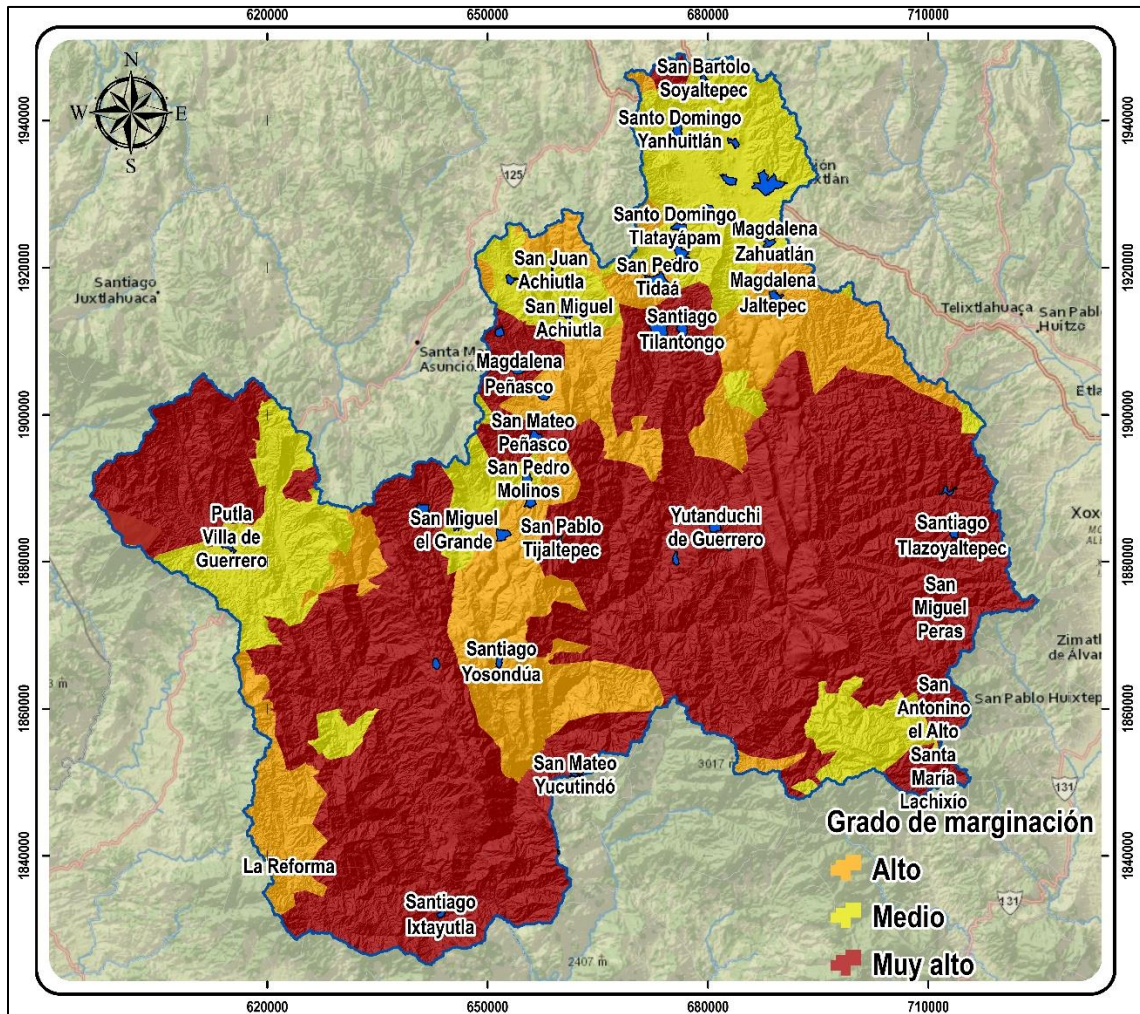


Figura 25. Grado de marginación que existe en los municipios y localidades de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

De las 1,285 localidades que componen la cuenca de estudio, 304 localidades presentan un muy alto grado de marginación y 810 presentan un alto grado de marginación, 24 localidades un grado de marginación medio, 6 localidades con bajo grado y solo una localidad con muy bajo grado de marginación.

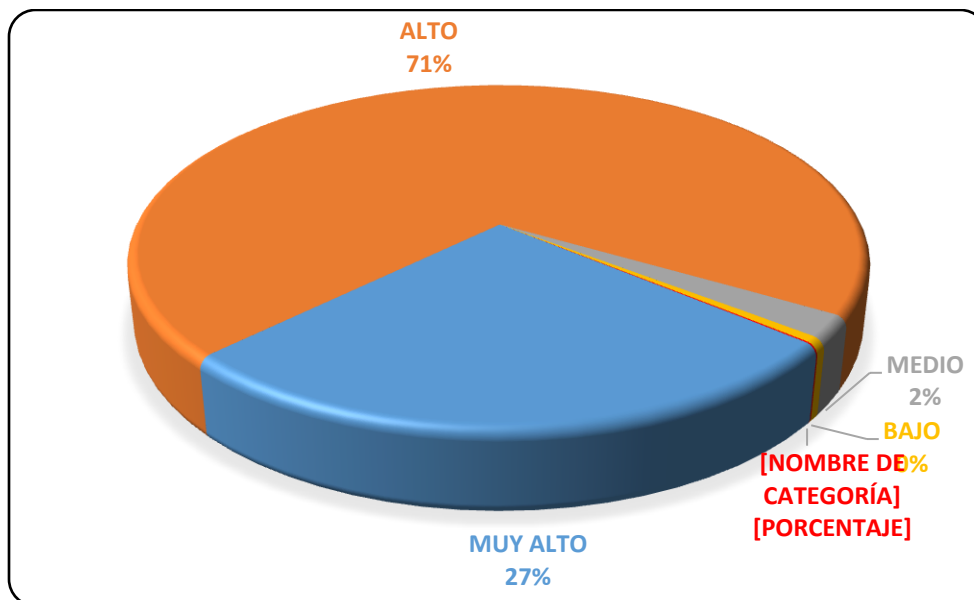


Figura 26. Grado de marginación que presentan las localidades del río Sordo, Oaxaca, México.

#### 5.4. Materiales

Para la corrida el modelo SWAT se emplearon los siguientes materiales:

- ✚ Modelo digital de elevaciones escala 1:50,000 con resolución de 15 m del INEGI (2012).
- ✚ Conjunto de datos vectoriales. Uso de suelo y vegetación, con resolución de 15m de la WWF (2014b).
- ✚ Conjunto de datos vectoriales (continuo nacional). Carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 de la serie IV del INEGI (2009).
- ✚ Conjunto de datos vectoriales (continuo nacional). Carta Edafológica, escala 1:250,000 de la serie II del INEGI (2006).
- ✚ Conjunto de datos vectoriales (continuo nacional). Carta geológica, escala 1:250,000 de la serie I del INEGI (1980).

También se consultaron bases de datos como:

- ✚ Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), publicación del 2006
- ✚ Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) publicado en 1999.
- ✚ La base de datos climática nacional (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con información recopilada al año 2010.



Y el empleo del siguiente software:

- ✚ ArcGis 10.
- ✚ La extensión para Arcgis 10, Soil and Water Assessment Tool (ArcSWAT 2012).
- ✚ Erdas imagine 9.1
- ✚ Base flow filter (Arnold, 1995)
- ✚ QGIS 2.8.1
- ✚ Global weather data for SWAT (CFSR, 2015)
- ✚ Microsoft Office Professional Plus 2013.
- ✚ SWATCUP (*Neprash technology*, 2012).
- ✚ Google earth pro

### 5.5. Metodología

Para realizar este trabajo se siguió la metodología mostrada en la Figura 27, donde se tienen como procesos el acopio de la información de entrada, la delimitación de la cuenca, la calibración del modelo y la validación del mismo.

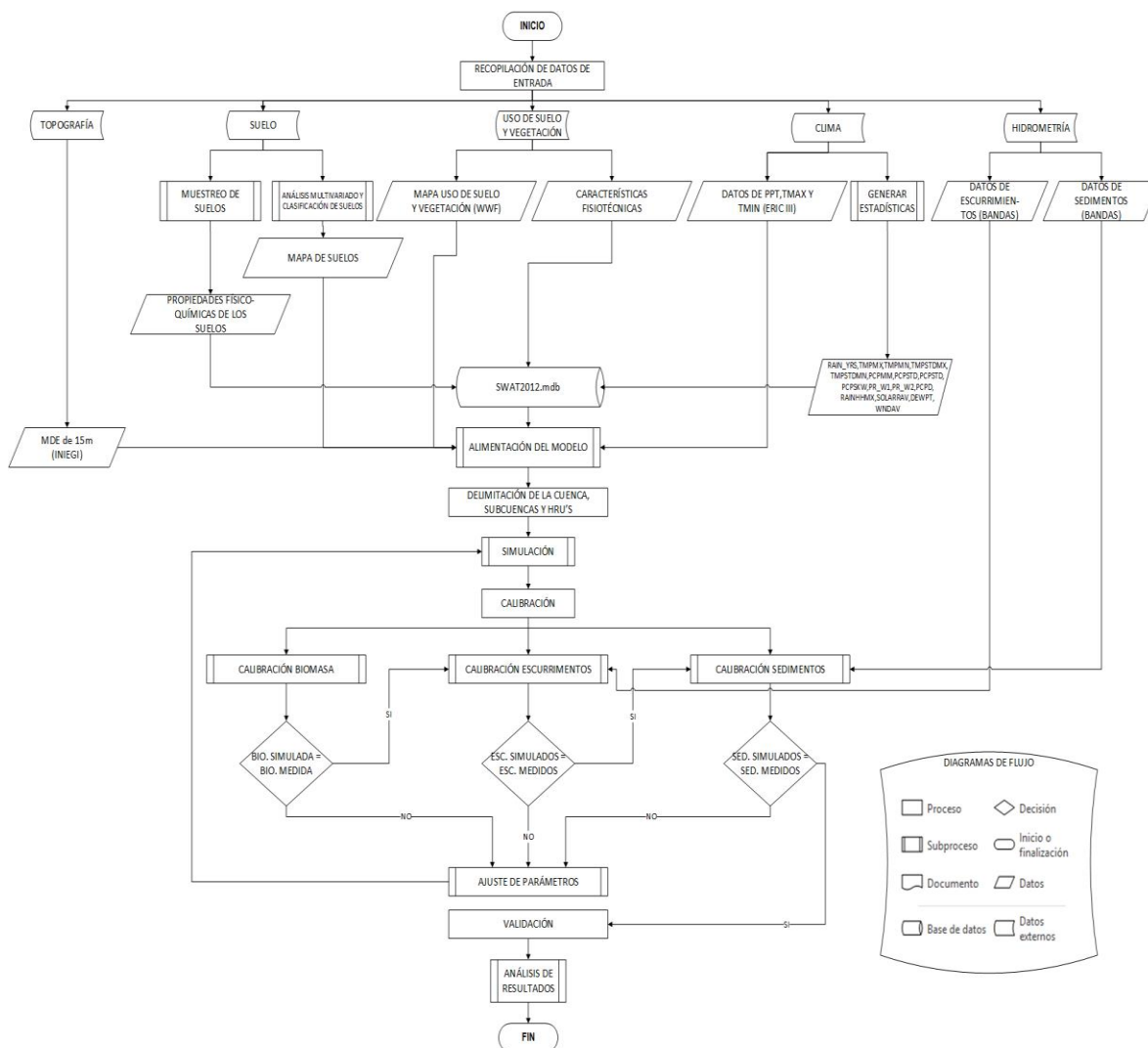


Figura 27. Metodología para la calibración y validación del modelo SWAT, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 5.5.1. Acopio de la Información de entrada

En esta primera etapa se gestionaron cada uno de los parámetros de entrada que requiere el modelo para su calibración y validación, los cuales se analizaron y seleccionaron para que tuvieran la mejor calidad.

#### 5.5.1.1. Información topográfica

Para correr el modelo se utilizó el MDE de 15 m de resolución del INEGI (2012). A este MDE se le hizo una corrección, utilizando la función *Fill* de ArcGIS 10, para rellenar vacíos en la superficie del *ráster* y quitar imperfecciones en la información del MDE.

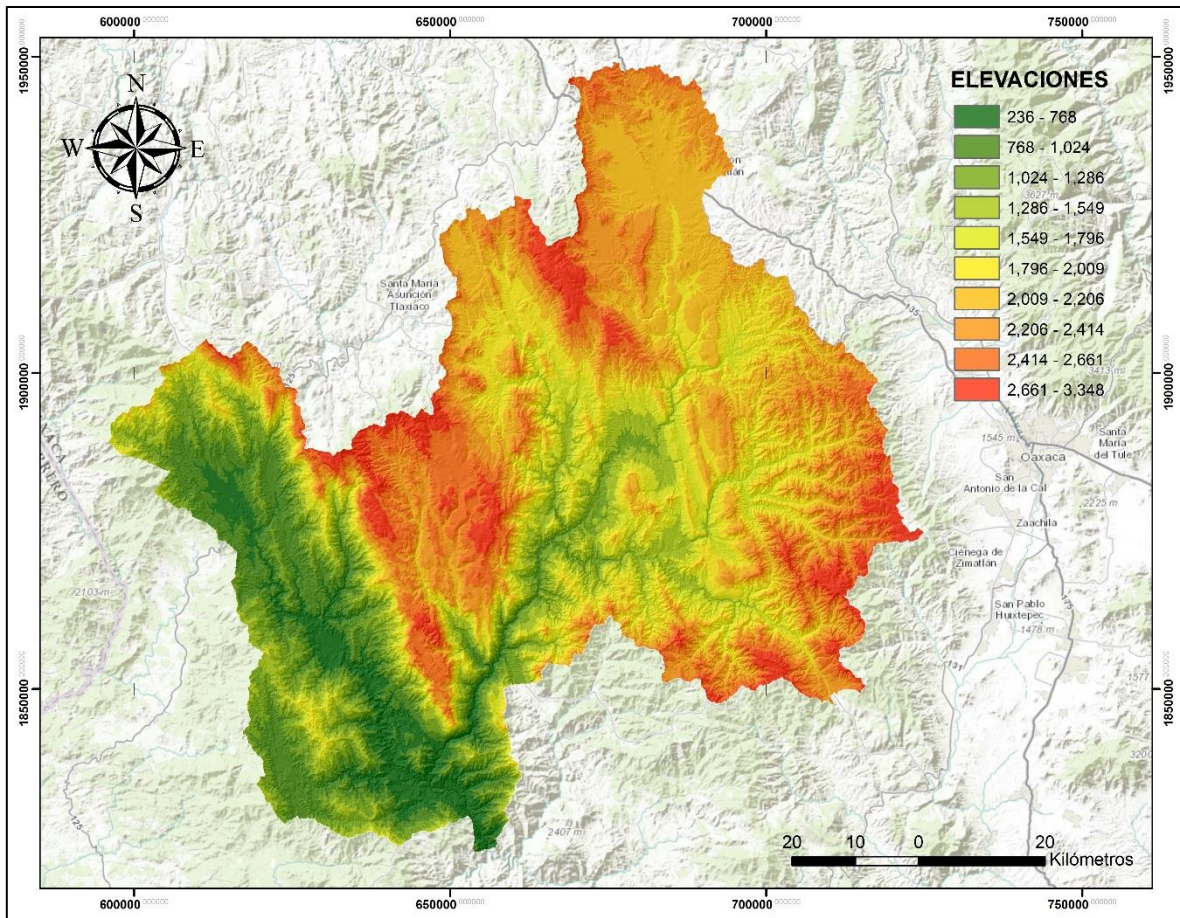


Figura 28. Elevaciones presentes en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 5.5.1.2. Información de uso de suelo y vegetación

La capa vectorial de uso de suelo y vegetación que se utilizó para alimentar al modelo, se obtuvo de un estudio realizado por la WWF (2014) en la cuenca a través de imágenes de satélite Landsat con resolución de 5m y verificación en campo (Figura 29).



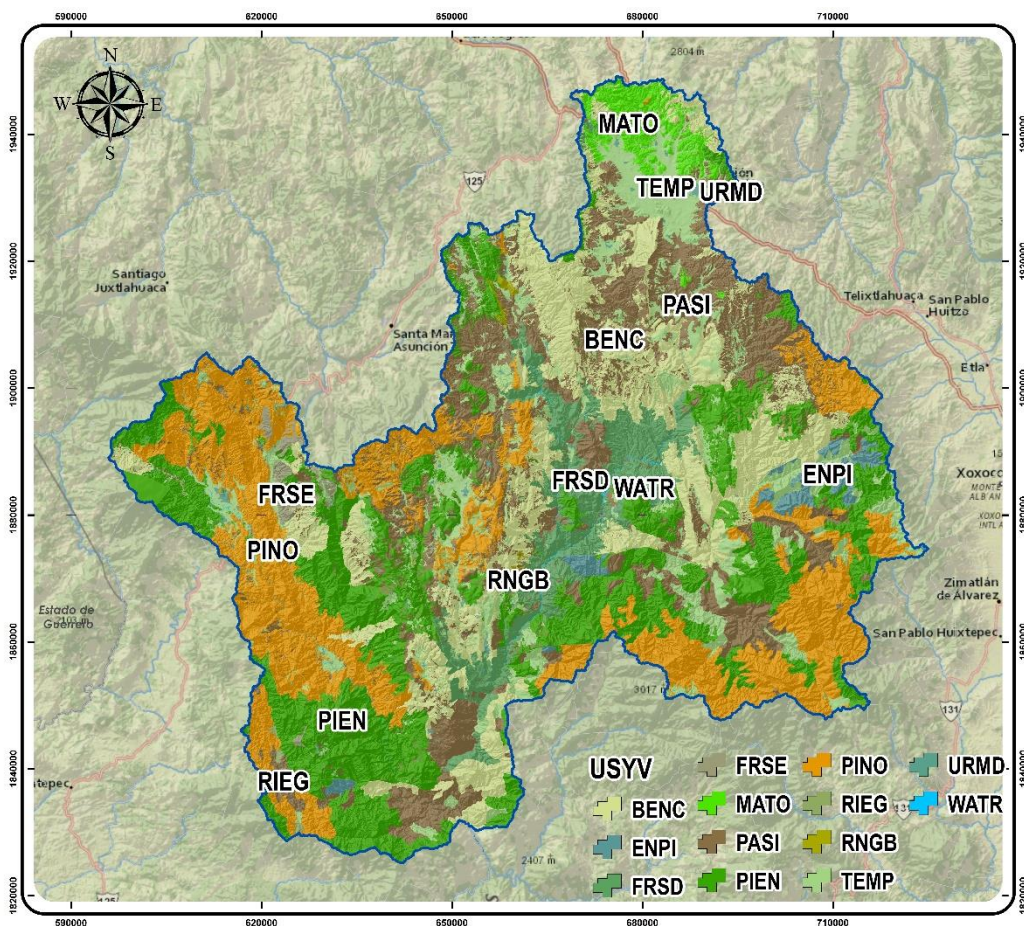


Figura 29. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (WWF, 2014).

De acuerdo con uso de suelo y vegetación de la WWF (2014), el 61.5 % de la cuenca está cubierto por algún tipo bosque, un 18.5 % por pastizales y solo 11 % aproximadamente por agricultura (Cuadro 16).

Cuadro 16. Superficie de las diferentes coberturas vegetales en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (WWF, 2014).

Clave	Descripción	Superficie (ha)	Superficie (%)
RIEG	Agricultura de riego	974.39	0.1
TEMP	Agricultura de temporal	82926.75	10.7
BENC	Bosque de encino	120901.90	15.6
ENPI	Bosque de encino-pino	10253.76	1.3
PINO	Bosque de pino	159326.96	20.6
PIEN	Bosque de pino-encino	179160.24	23.1
FRSE	Bosque mesofilo de montaña	5359.40	0.7
MATO	Chaparral	16269.98	2.1
WATR	Cuerpos de agua	1145.13	0.1
FRSD	Selva baja caducifolia	49401.51	6.4



Clave	Descripción	Superficie (ha)	Superficie (%)
PASI	Pastizal	143755.72	18.5
RNGB	Bosque de táscate	1823.12	0.2
UMRD	Residencial mediana densidad	3843.14	0.5
<b>Total general</b>		<b>775142.01</b>	<b>100.0</b>

Para cargar al modelo los polígonos de cobertura vegetal, estos se ajustaron a la superficie de la cuenca y se convirtieron a formato *grid*. Así mismo, se asignó a cada cobertura vegetal presente los 45 parámetros fisiotécnicos que requiere SWAT (Cuadro 17). Esta información se capturó en la base de datos “*crop*” (SWAT2012.mdb) con los datos fisiotécnicos de los 13 tipos de vegetación presentes en la cuenca mediante información recopilada en estudios anteriores<sup>2</sup>. Los parámetros fisiotécnicos, de cada tipo de vegetación, se reportan en el Anexo 1.

**Cuadro 17.** Descripción de los parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo SWAT.

Parámetro	Descripción
CPNM	Código de 4 caracteres para representar la cobertura del suelo/nombre planta
IDC	Cobertura del suelo / clasificación de las plantas.
BIO_E	Biomasa / Ratio de Energía (MJ m <sup>-2</sup> )
HVSTI	Índice de cosecha. (kg ha <sup>-1</sup> )
BLAI	índice de área foliar máxima (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
FRGRW1	Fracción de la temporada de cultivo de plantas correspondiente a la primer punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área.
LAIMX1	Fracción de la longitud. Índice de área foliar correspondiente a la primer punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área.
FRGRW2	Fracción de la temporada de cultivo de plantas correspondientes a la segundo punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área
LAIMX2	Fracción de la longitud. Índice de área foliar correspondiente a la segunda punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área
DLAI	Fracción de la estación de crecimiento cuando el área de la hoja comienza a disminuir.
CHTMX	Máxima altura del dosel.
RDMX	Máxima profundidad de las raíces. (m)
T_OPT	Temperatura óptima para el crecimiento vegetal. (°C)
T_BASE	Temperatura mínima de crecimiento de las plantas. (°C)
CNYLD	Fracción de nitrógeno en las semillas. (kg N/kg semilla)
CPYLD	Fracción de fósforo en las semillas. (kg P/kg semilla)
BN1	Fracción de N en las plantas durante la emergencia.
BN2	Fracción de N en la planta de 0.5 madurez.
BN3	Fracción de N en la planta en la madurez
BP1	Fracción de P durante la emergencia.

<sup>2</sup> Salas, et. al, 2014.



Parámetro	Descripción
BP2	Fracción de P en el 0.5 madurez.
BP3	Fracción de P en la madurez.
WSYF	Límite inferior del índice de cosecha.
USLE_C	Valor mínimo de la USLE factor C aplicable a la cobertura del suelo / planta.
GSI	Max estomas de la conductancia (en condiciones sequía).
VPDFR	Déficit de presión de vapor que corresponde a la conductancia estomática máxima fracción definida por FRGMAX
FRGMAX	Fracción del máximo de la conductancia estomatal que se puede lograr con un déficit de alta presión de vapor.
WAVP	Tasa de disminución en la eficiencia de la radiación uso por unidad de incremento en el déficit de presión de vapor.
CO2HI	Elevada concentración de CO2 atmosférico. (ul l <sup>-1</sup> )
BIOEHI	La energía de biomasa proporción correspondiente a la segunda. Punto de la curva de eficiencia en el uso de radiación.
RSDCO_PL	Coefficiente de descomposición de los residuos de planta.
Cropname	Nombre de la descripción de los cultivos.
CN2	Escorrentía SCS curva número de condición de humedad II.
OV_N	Manning "n" el valor de la escorrentía superficial.
FERTFIELD	Si se selecciona esta cosecha va a ser fecundado.
ALAI_MIN	Mínimo de superficie de la hoja de índice para la planta durante el período de reposo
BIO_LEAF	Fracción de biomasa de los árboles convierten en residuos durante la latencia
MAT_YRS	Número de años necesarios para las especies de árboles para alcanzar el pleno desarrollo
BMX_TREES	Máximo de biomasa de un bosque. (t ha <sup>-1</sup> )
EXT_COEF	Coefficiente de extinción de la luz.
CN2A	Escorrentía SCS número de curva condición de humedad II.
CN2B	Escorrentía SCS número de curva condición de humedad II.
CN2C	Escorrentía SCS número de curva condición de humedad II.
CN2D	Escorrentía SCS número de curva condición de humedad II.
BM_DIEOFF	Fracción de biomasa muerta

El modelo se alimentó con información relacionada a las prácticas agrícolas que realizan los productores en la región para la preparación del terreno, siembra, riego, fertilización, control de malezas, control de plagas y enfermedades, cosecha, etc. De este modo, se tomaron las operaciones, fechas y cantidades del paquete tecnológico para el ciclo primavera-verano de este cultivo obtenido por Salas (2014), el cual se detalla en el Cuadro 18. Dada la importancia agrícola regional del cultivo de maíz en condiciones de temporal, las áreas agrícolas se consideraron como si fueran cultivadas en su totalidad por maíz.

**Cuadro 18.** Paquete tecnológico del cultivo de maíz para la Mixteca Oaxaqueña (Salas, 2014).

Operación	Concepto/Actividad	Unidad	Cantidad	Observaciones
-----------	--------------------	--------	----------	---------------



Operación	Concepto/Actividad	Unidad	Cantidad	Observaciones
Preparación del terreno	Barbecho	ha	1	Es el paso de arado de disco tirado por tractor agrícola en un tiempo de 2.5 h. En la región la mayoría de los productores realizan esta actividad con tracción animal y arado tradicional. Esta actividad se realiza 15 días antes de la siembra.
	Rastreo	ha	1	Es el paso de la rastra de discos tirado por tractor agrícola en un tiempo de 2 h. Esta actividad se realiza por una minoría de los productores y se efectúa unos días antes de la siembra.
Siembra	Tipo de semilla	Los productores usan variedades criollas, que seleccionan del ciclo anterior.		
	Semilla	kg	20	
	Siembra manual	Jornales*	4	
	Arreglo topológico			Mateado.
	Distancia entre surcos	m	0.8	
	Distancia entre matas	m	0.7	
	Densidad de siembra	Plantas ha <sup>-1</sup>	35,700	Generalmente 2 plantas por mata pero esta densidad varía según el número de semillas por mata.
Fecha de siembra	La siembra se realiza en los primeros días de junio.			
Control de malezas	Deshierbe y aclareo	Jornales*	5	Esta actividad se realiza en el mes de julio, aproximadamente un mes después de la siembra.
	Aporque	Jornales*	5	
Fertilización	Fórmula de fertilización	60-26-00 (N-P-K)		Según se establezca la época de lluvias.
	Aplicación	Jornales	3	Se realiza después del deshierbe y aclareo.
	Cosecha			
	Pizca	Jornales*	5	
	Deshoje y desgrane	Jornales*	5	
Fecha de cosecha	La cosecha se realiza en la primera quincena de noviembre.			

### 5.5.1.3. Información de suelos

Para alimentar el modelo, los tipos de suelos presentes en la cuenca se generaron mediante un análisis multivariado sobre las principales variables ambientales que caracterizan la formación de los mismos. En primer lugar, la información ambiental

se estandarizó en un *raster* con valores de 0 a 256 (Figura 30) con base en las características de sus histogramas, para ecualizar aquellas áreas con información no significativa (*Null* en ArcGIS). Tomando en cuenta la correlación que existe entre las diferentes variables ambientales incluidas, el análisis se inició con la simplificación de la información, asumiendo la menor pérdida posible, en sus primeros seis componentes.

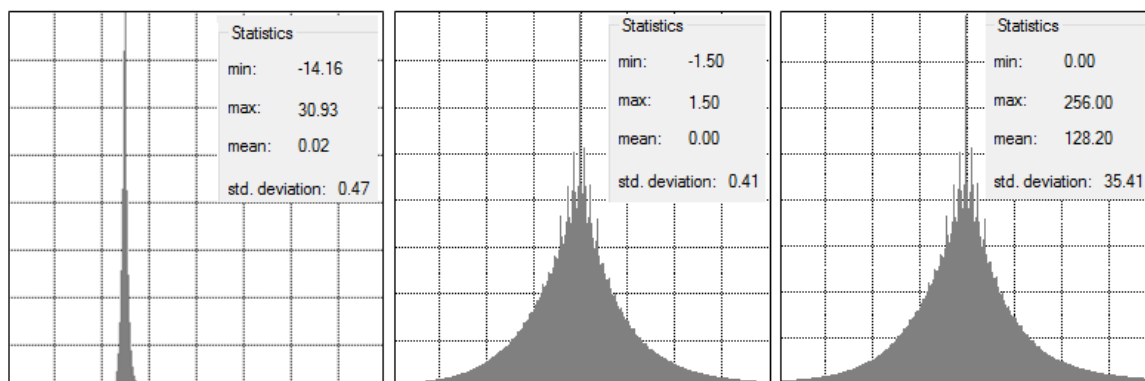


Figura 30. Ejemplo del ajuste del histograma de la variable curvatura.

Esta simplificación de la información se efectuó en ArcGis 10, con la herramienta *Principal Components*, donde se tomaron como bandas de entrada once indicadores que inciden en la formación del suelo: índice topográfico de humedad, índice de posición topográfica, pendiente, curvatura vertical, curvatura horizontal, aspecto topográfico, densidad de drenaje, distancia a picos, temperatura, precipitación y longitud de la pendiente, para obtener como producto un *raster* multibanda (Figura 31).

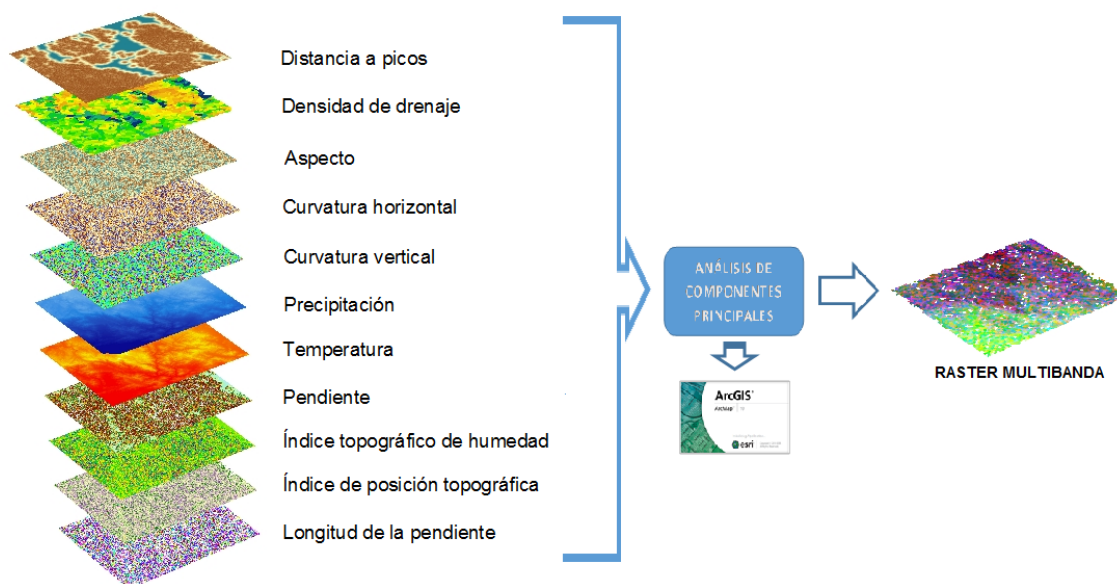


Figura 31. Procedimiento realizado para el ACP detallado de manera general.

Posteriormente, a través del archivo de estadísticas de salida, se observó que los seis primeros componentes describían el 92 % de la varianza, por lo que para el análisis de clasificación los cinco componentes restantes no se tomaron en cuenta.

Una vez hecho lo anterior, se procedió a realizar una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud empleando la herramienta *Maximum Likelihood Classification*. Para ello se tomaron, como firmas o áreas de entrenamiento, polígonos representativos de las unidades de suelo reportadas por la carta edafológica (serie II) del INEGI (2006). Para esta clasificación se tomaron nueve grupos de suelos: acrisoles, cambisoles, flivisoles, luvisoles, phaeozem, regosol, rendzinas, litosoles y vertisoles. De una comparación, entre suelos observados y los estimados por el análisis cartográfico, se obtuvo una eficiencia del 60 % (Anexo 8).

Las propiedades físicas y químicas, de los nueve suelos presentes en la cuenca, se definieron a partir del análisis de laboratorio de las muestras de suelo levantadas en campo (Anexo 2). La información resultante se capturó en la base de datos “usersoils.dbf” de SWAT (Anexo 3).



Figura 32. Muestreo de suelos realizado en la cuenca del río Sordo en Oaxaca, México.

#### 5.5.1.4. Información climática

El modelo SWAT requiere, al menos, de datos diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas para alimentar el sub-modelo *Weather Station*. Para la gestión de esta información, en primer lugar, se seleccionaron las estaciones meteorológicas con el mayor registro de datos y con una continuidad mínima de 10 años. Esta información se obtuvo a través del ERIC (IMTA, 2009). A partir de la información reportada para cada estación, en la cuenca y sus inmediaciones, se seleccionaron 24 estaciones con el mejor porcentaje de registro de datos diarios y con un periodo continuo de registro entre 1975 y 1985; similar al registro hidrométrico seleccionado para calibrar y validar el modelo. Aunque los datos meteorológicos faltantes son mínimos, durante estos once años, los datos faltantes se estimaron con la red meteorológica y usando el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW).

Una vez estimados los datos faltantes, para el periodo de calibración y validación, se capturaron los datos meteorológicos diarios, en el formato requerido por el modelo (\*.txt), de temperatura (máxima y mínima) y precipitación. Para estas mismas 24 estaciones meteorológicas se generaron los 18 parámetros estadísticos a nivel mensual que necesita SWAT (Cuadro 19) para estimar diariamente (durante la calibración y validación) datos de radiación solar, velocidad de viento, punto de rocío y humedad relativa.

Cuadro 19. Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático SWAT.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Descripción
STATION	0	0	Nombre de la estación meteorológica
WLATITUDE	-90	90	Latitud de la estación meteorológica (grados)
WELEV	0	5000	Elevación de la estación meteorológica (m)
RAIN_YRS	5	100	Número de años de datos mensuales para precipitaciones en 30 min



Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Descripción
TMPMX	-30	50	Temperatura máxima promedio del aire para el mes (°C)
TMPMN	-40	40	Temperatura mínima promedio del aire para el mes (°C)
TMPSTDMX	0.1	100	Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes (°C)
TMPSTDMN	0.1	30	Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes (°C)
PCPMM	0	600	Precipitación media que cae en el mes (mm)
PCPSTD	0.1	50	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes (mm)
PCPSKW	-50	20	Coefficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes
PR_W1	0	0.95	Probabilidad de que un día húmedo después de un día seco en el mes (fracción)
PR_W2	0	0.95	Probabilidad de un día húmedo después de un día de lluvia en el mes (fracción)
PCPD	0	31	Número promedio de días de precipitación en el mes
RAINHHMX	0	125	Precipitación máxima en media hora durante el mes (mm)
SOLARAV	0	750	Radiación solar Promedio diaria en el mes
DEWPT	-50	25	Temperatura del punto de rocío promedio en el mes (°C)
WNDVAV	0	100	Velocidad media del viento en el mes (m s <sup>-1</sup> )

Para definir las siguientes variables estadísticas: PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PRW1, PRW2 Y PCPD se empleó el programa *pcpSTAT*<sup>3</sup>, donde se utilizó como dato de entrada los datos meteorológicos diarios de precipitación y temperatura (máxima y mínima).

Para la obtener los valores de TMPMX, TMPMN, TMPSTDMX, TMPSTDMN y SOLARAV se utilizó Excel. Para estimar la radiación solar media mensual se utilizó la metodología propuesta por FAO (1990).

Para la temperatura media mensual del punto de rocío (DEWPT) se empleó el programa *dew.exe*<sup>4</sup> generado por Liersch (2003).

Para estimar el parámetro WNDVAV se descargó de *Global Weather Data for SWAT*<sup>5</sup>, para la zona de estudio, los datos diarios de velocidad de viento de 81 cuadrantes de 33x33 km. A partir de los datos diarios, por cuadrante, se obtuvo la media mensual y estos se interpolaron en una malla, igual a la utilizada para correr SWAT, de 15x15 m. De esta última malla se extrajeron los valores medios mensuales de viento para las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis.

La precipitación máxima mensual en media hora (RAINHHMX) se estimó con el método de Chen (1983), a través de un análisis de frecuencias de precipitaciones máximas registradas en 24 h, para diferentes periodos de retorno y su ajuste a la distribución de probabilidad de Gumbel, ver Anexo 7.

<sup>3</sup> Programa para descarga en <http://swat.tamu.edu/software/links/#>, elaborado por Liersch (2013).

<sup>4</sup> El programa fue descargado del sitio web del SWAT <http://swat.tamu.edu/software/links/#>

<sup>5</sup> <http://globalweather.tamu.edu/>



### 5.5.1.5. Información hidrométrica

De las tres estaciones hidrométricas ubicadas dentro del área de estudio (Cuadro 7) la estación Ixtayutla, con clave CONAGUA 20,021, presentó el mayor número de aforos para escurrimientos y sedimentos. De esta estación se usaron registros de 10 años, de 1975 a 1981 para calibrar y de 1982 a 1985 para validar el modelo.

Los aforos de escurrimientos y sedimentos, mensuales y anuales, empleados para calibrar y validar del modelo se obtuvieron de BANDAS (2008).

En el Cuadro 20 se presentan los escurrimientos mensuales y en el Cuadro 21 la producción mensual de sedimentos registrados entre 1975 y 1985.

**Cuadro 20.** Datos mensuales de escurrimientos (miles de m<sup>3</sup>) en la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), Santiago Ixtayutla, Oaxaca, México.

Mes	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Ene	92409.6	90268.6	85945.7	104257.3	99306.5	98411.5	86335.2	130942.5	69094.8	99524.8	117276.5
Feb	68148.8	67896.2	63758.4	63508.1	77370.3	71271.4	67533.3	ND	69379.0	80537.8	72039.0
Mar	58326.4	62301.4	52429.5	60744.5	50679.4	51889.8	62308.3	ND	58660.3	56188.6	68080.2
Abr	42494.7	69757.2	40756.2	48874.9	51403.4	54281.4	55702.8	70929.3	33711.2	34332.9	58148.0
May	147074.4	82498.9	95102.8	32348.4	87968.3	119627.8	49355.6	153895.4	32699.7	118016.1	89730.5
Jun	431174.4	154530.1	306328.4	291354.4	110061.9	121921.4	605773.0	151835.6	168794.7	572610.3	258384.4
Jul	438095.8	455510.6	264273.9	427602.0	318755.1	298339.8	827004.1	259955.6	397451.8	950613.4	486201.5
Ago	560040.4	306490.8	397000.3	429622.4	504297.1	720952.6	905884.1	208670.3	344512.8	775107.4	651891.5
Sep	1008327.0	342327.6	494102.5	613183.5	1075164.0	792499.4	999505.8	309604.2	809183.2	1437284.0	508229.0
Oct	366573.2	608187.1	446403.2	671107.5	304744.3	493482.4	708340.9	391849.7	298566.7	504823.0	451534.5
Nov	185734.0	201265.1	259874.7	218769.3	157795.4	195451.9	281339.3	140302.5	166644.1	229405.7	228576.8
Dic	129160.7	119882.4	155093.8	150417.2	109499.6	120868.4	185170.2	96837.0	123302.7	155496.7	134334.2

ND=No disponible.

**Cuadro 21.** Datos mensuales de volumen de sedimentos (miles de m<sup>3</sup>) para la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), Santiago Ixtayutla, Oaxaca, México.

Mes	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1983	1984	1985
Ene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.82	0.00	0.00	0.00	0.00
Feb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.46	33.21	0.00	0.00
Mar	0.00	0.00	0.00	110.97	0.00	8.39	106.89	10.05	13.65	0.00
Abr	0.00	752.87	0.00	40.49	138.65	90.60	183.58	0.00	0.00	198.20
May	107.02	558.95	841.78	13.65	831.51	52.89	440.17	13.71	354.54	485.17
Jun	785.49	904.56	4621.17	2674.72	468.08	115.44	5119.70	2364.54	2067.95	843.35
Jul	1711.19	4474.62	34.82	707.87	2090.85	807.18	2617.24	1142.20	2307.93	1245.41
Ago	840.27	2053.82	0.00	477.37	1099.29	3101.06	1866.48	270.87	923.09	1006.46
Sep	3039.92	2292.22	1648.44	727.97	3014.50	2240.38	1626.42	1506.44	4663.77	356.79
Oct	154.08	3824.04	576.16	946.36	71.55	927.09	610.42	118.24	0.00	422.78

Mes	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1983	1984	1985
Nov	0.00	0.00	109.77	15.02	0.96	41.32	37.24	0.00	0.00	0.00
Dic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 5.5.2. Delimitación de la cuenca y alimentación del modelo SWAT

La cuenca del río Sordo se delimitó con la interface del modelo SWAT denominado *Watershed Delineation* (Figura 33) y usando un MDE, de 15 m resolución, de INEGI (2012). Se tomó como punto de salida la estación hidrométrica Ixtlayutla (20,021), localizada en 16° 32' 55.9" de latitud norte y 97° 34' 0.07" de longitud oeste.

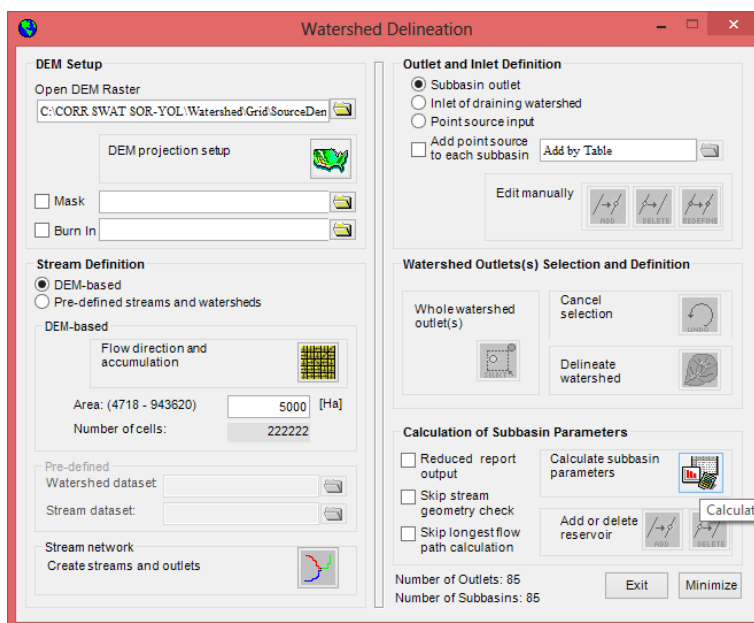


Figura 33. Interface *Watershed delineation* utilizada para la delimitación de la cuenca.

Posteriormente se crearon las HRU mediante la interface *HRU Analysis* combinando, en formato *grid*, tipos de cubierta vegetal, unidades de suelo y dos rango de pendiente del terreno. A las primeras dos capas se les asignó una tabla (*usersoils* y *crop*, respectivamente) para relacionar los valores de cada capa con parámetros necesarios para los cálculos de SWAT (ver Anexo 1 y Anexo 3). Para la pendiente del terreno se utilizó el criterio *Multiple Slope (Pendiente múltiple)* donde se usaron dos intervalos, el primero de 0 a 5 % y el segundo mayor a 5 % (Figura 34).

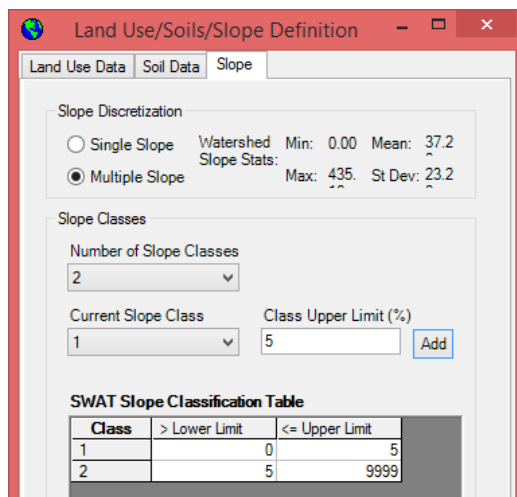


Figura 34. Ventana para la definición de la pendiente.

Con la función *HRU Definition* se establecieron los criterios para la sobre posición de las capas de Vegetación/Suelo/Pendiente. Para esto, se utilizó el criterio *Multiple HRU*, donde se especificó al modelo eliminar aquellas HRU con ocupaciones inferiores al 5 % para tipo de vegetación, unidad de suelo y rango de pendiente (Figura 35).

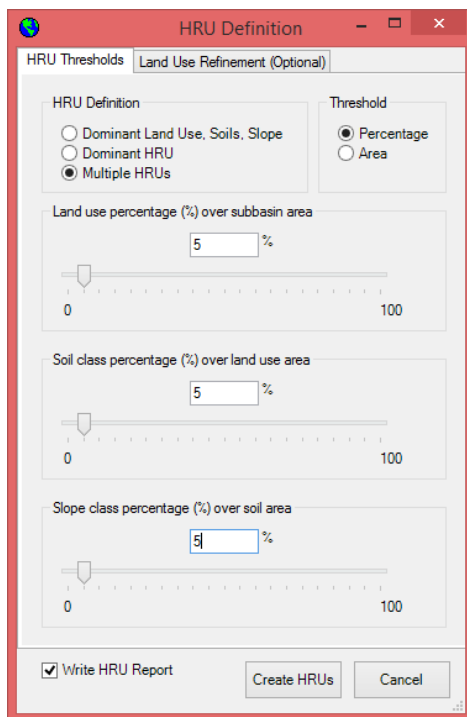


Figura 35. Ventana de la función HRU Definition utilizada para definir las HRU de la cuenca.

Finalmente, mediante la interface *Write input tables* se seleccionaron los datos meteorológicos, indicados en el punto de 5.5.1.4 - Información climática. Así



mismo esta interface verificó que la información proporcionada estuviera en el formato correspondiente.

### 5.5.3. Calibración del modelo

La calibración del modelo SWAT consistió en lograr un arreglo satisfactorio entre los valores simulados y observados, mediante el ajuste de los parámetros de mayor influencia. Para ello, se inició con la calibración del modelo de crecimiento vegetativo, posteriormente se continuó con los volúmenes de escurrimiento a nivel anual y mensual, y por último con la producción de sedimentos a nivel anual y mensual.

Para efectuar estas calibraciones se utilizó la base de datos climáticos diarios del periodo de 1975 a 1981 que incluye datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas. Se utilizó el método propuesto por Priestley - Taylor para estimar la evapotranspiración y el método de la ecuación simplificada de Bagnold para el tránsito de sedimentos.

Con base en los trabajos de Salas (2013) y Ramírez (2014) y lo propuesto por el manual del SWAT, se realizaron corridas con variaciones pequeñas, no mayores al 10 %, en la mayoría de los parámetros; las cuales se especifican a continuación para cada tipo calibración realizada.

#### 5.5.3.1. Calibración de biomasa

Para calibrar la biomasa fue necesario conocer la cantidad de esta que producen los diferentes tipos de vegetación presentes en la cuenca; para ello se tomaron como base los estudios realizados por INEGI (2001), los cuales se muestran en el Cuadro 22. Estos valores de producción de biomasa anual, para las 12 asociaciones vegetales presentes en la cuenca, se reportan en toneladas de materia seca por hectárea.

**Cuadro 22.** Producción de biomasa reportada para los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca (INEGI, 2001).

Clave	Uso de suelo y vegetación	Biomasa (t MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )		
		Mínimo	Promedio	Máximo
BENC	Bosque de encino	10	11	12
ENPI	Bosque de encino-pino	11	12	13
FRSD	Selva baja caducifolia	5	7	9
FRSE	Bosque mesófilo de montaña	14	16	18
MATO	Chaparral	5	6	7
PASI	Pastizal inducido	3	4	5
PIEN	Bosque de pino-encino	12	13	14
PINO	Bosque de pino	13	14	15

RIEG	Agricultura de riego	7	8.5	10
RNGB	Bosque de táscate	8	9	10
TEMP	Agricultura de temporal	3	4.5	6
BENC	Bosque de encino	10	11	12

Los valores de biomasa media anual estimada por el SWAT para cada cobertura vegetal se tomaron del *SWAT Check* en su pestaña *Land use summary* (Figura 36).

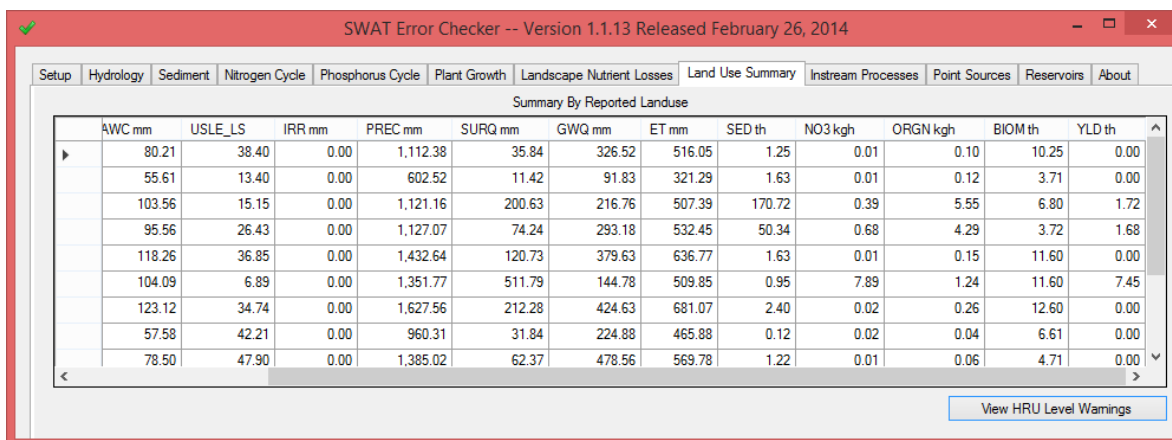


Figura 36. Ventana del SWAT Check donde el SWAT reporta los valores estimados de biomasa media anual.

Los parámetros ajustados, durante la calibración, de la biomasa se muestran en el Cuadro 23. Se procuró que estos parámetros variaran dentro de los rangos recomendados por el manual del SWAT (2009).

Cuadro 23. Parámetros ajustados para la calibración de biomasa.

Parámetro	Descripción	Archivo de entrada
BIO_E	Conversión de energía en biomasa	Plant.dat
HVSTI	Índice de cosecha	Plant.dat
BLAI	Índice de área foliar	Plant.dat

El modelo también fue sensible a las unidades calor necesarias para alcanzar la madurez, las cuales se estimaron en una hoja de cálculo, con base en la literatura revisada.

### 5.5.3.2. Calibración de escurrimientos

Esta calibración buscó ajustar de forma satisfactoria, a nivel mensual y anual, los escurrimientos observados y los simulados por SWAT, mediante variaciones en los parámetros de mayor influencia.

Los escurrimientos simulados, usados para calibrar SWAT, se reportan en el campo *Flow\_out*, del archivo de salida *output.rch*, en  $m^3 s^{-1}$ . Los escurrimientos



observados, utilizados para la calibración, se obtuvieron de BANDAS (2008), mismos que se reproducen en el Cuadro 20, y se convirtieron de volumen (miles de  $m^3$ ) a caudal ( $m^3 s^{-1}$ ).

En el Cuadro 24 se muestran los parámetros ajustados, durante la calibración, de escurrimientos. Sus valores originales se variaron dentro de los rangos recomendados por el manual del SWAT (2009).

**Cuadro 24.** Parámetros ajustados para la calibración de escurrimientos.

Parámetro	Descripción	Archivo de entrada
CN2	Curva numérica condición de humedad II	.mgt
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	.sol
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	.hru
OV_N	Rugosidad de Manning para el flujo superficial	.hru
GW_REVAP	Coeficiente del "revap" del agua subterránea	.gw
GWQMN	Profundidad del agua en el acuífero somero	.gw
ALPHA_BF	Constante de recesión del flujo base	.gw

La curva numérica, para la condición de humedad II (OV\_N), se calculó con ayuda del programa SWAT CUP<sup>6</sup> mediante el método de calibración SUFI .

Los parámetros SOL\_AWC, ESCO, OV\_N, GW\_REVAP y GWQMN, se calibraron moviendo los valores para cada tipo de vegetación.

El parámetro alfa\_bf (equivalente al coeficiente de agotamiento), que varía entre 0 (para acuíferos con una respuesta muy rápida frente a la precipitación) y 1 (para acuíferos con mucha inercia), se ajustó con el programa BaseFlow<sup>7</sup>, el cual separa el flujo base del flujo total.

### 5.5.3.3. Calibración de sedimentos

Par la calibración de sedimentos, a nivel mensual y anual, se modificaron los parámetros de mayor influencia, de tal forma que los sedimentos simulados por el modelo y los observados en la estación hidrométrica tuvieran un ajuste satisfactorio.

Los sedimentos simulados, usados para la calibración, se reportan en el campo *Sed\_out* del archivo de salida *output.rch*. Los sedimentos observados, utilizados para calibrar el modelo, se obtuvieron de BANDAS (2008). Estos valores, reportados en el Cuadro 21, se transformaron de volumen (miles de  $m^3$ ) a masa

<sup>6</sup> Disponible en: <http://www.neprashtechology.ca/Downloads.aspx>

<sup>7</sup> Disponible en: <http://swat.tamu.edu/software/baseflow-filter-program/>

(toneladas). Para la transformación se multiplicó el volumen reportado, de los sedimentos en suspensión, por una densidad media de  $1.72 \text{ t m}^{-3}$ .

Los parámetros que se ajustaron durante la calibración de sedimentos se muestran en el Cuadro 25. Estos parámetros se variaron dentro de los rangos recomendados por el manual del SWAT (2009).

**Cuadro 25.** Parámetros ajustados en la calibración de sedimentos.

Parámetro	Descripción	Archivo de entrada
USLE_P	Factor prácticas	.mgt
USLE_C	Factor de cobertura de la planta	Crop.dat
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente para el escurrimiento superficial	.hru
CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning en el canal principal	.rte
CH_COV1	Factor cobertura del canal	.rte
CH_EROD	Factor de erodabilidad del canal	.rte

El factor de prácticas de labranza (USLE\_P) se modificó únicamente para los polígonos agrícolas. Para este parámetro se asumió un valor de 0.8, según lo recomendado por Martínez (2005) para surcos rectos.

El factor de cobertura de la planta (USLE\_C) se ajustó, para cada tipo de vegetación presente en la cuenca, con base en Neitsch *et al.* (2009).

**Cuadro 26.** Factor de cobertura vegetal asignado a cada tipo de vegetación de la cuenca.

Cobertura vegetal	USLE_C
Agricultura de riego	0.2000
Pastizal Inducido	0.0420
Bosque de encino	0.0038
Encino-pino	0.0010
Agricultura de temporal	0.2000
Pino-encino	0.0032
Bosque de pino	0.0016
Agua	0.0000
Chaparral	0.0160

La longitud de la pendiente (SLSUBBSN) se define como la distancia desde el origen de flujo superficial hasta el sitio donde se produzca el depósito de sedimentos o donde se entreguen las aguas a un cauce (Correa, 2011). Su ajuste se efectuó en el programa QGIS 2.8.1, mediante la herramienta *Slope Length* del apartado **Hydrology**, a través del MDE de la cuenca. Posteriormente, en ArcGis 10 se estimó por cada HRU, mediante la herramienta *Zonal Statistics as table* de *Spatial Analyst*, la media y la desviación estándar de las distancia.



El coeficiente de rugosidad de Manning del canal principal (CH\_N2) se ajustó con base en Neitsch *et al.*, 2009 tomando un coeficiente para un cauce natural de 0.050 (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) para canales (Chow, 1959).

Características del canal	Promedio	Rango
Excavado o dragado		
Terra, recta y uniforme	0.025	0.016 – 0.033
Tierra, sinuosa y lenta	0.035	0.023 – 0.050
Sin mantenimiento, malezas y arbustos	0.075	0.040 – 0.140
Cauces naturales		
Pocos árboles, piedras o arbustos	0.050	0.025 – 0.065
Árboles de monte y arbustos	0.100	0.050 – 0.150

El factor de erosionabilidad del canal (CH\_COV1) es conceptualmente similar al factor de erodabilidad del suelo utilizado en la USLE. La erosionabilidad del canal es una función de propiedades de la cama o materiales de banco del canal. Para el ajustar CH\_COV1 se tomó el valor para un cauce sin resistencia a la erosión (Neitsch *et al.*, 2009).

#### 5.5.4. Validación del modelo

La validación del modelo consistió en cuantificar la confiabilidad los parámetros calibrados a través de un periodo adicional de datos escurrimientos y sedimentos observados. Así, el periodo utilizado para validar escurrimientos fue de 1982-1985 y para sedimentos fue de 1983-1985. Para evaluar la confiabilidad de los resultados, simulados por SWAT, se utilizaron el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y el índice de eficiencia de Nash-Suttcliffe (NSF).

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Delimitación de la cuenca

Producto de la delimitación de la cuenca, hasta la estación Ixtlayutla, el modelo reporta una superficie de 7,751.4 km<sup>2</sup>, distribuida en 175 subcuencas y 1,729 unidades de respuesta hidrológica (Figura 37).



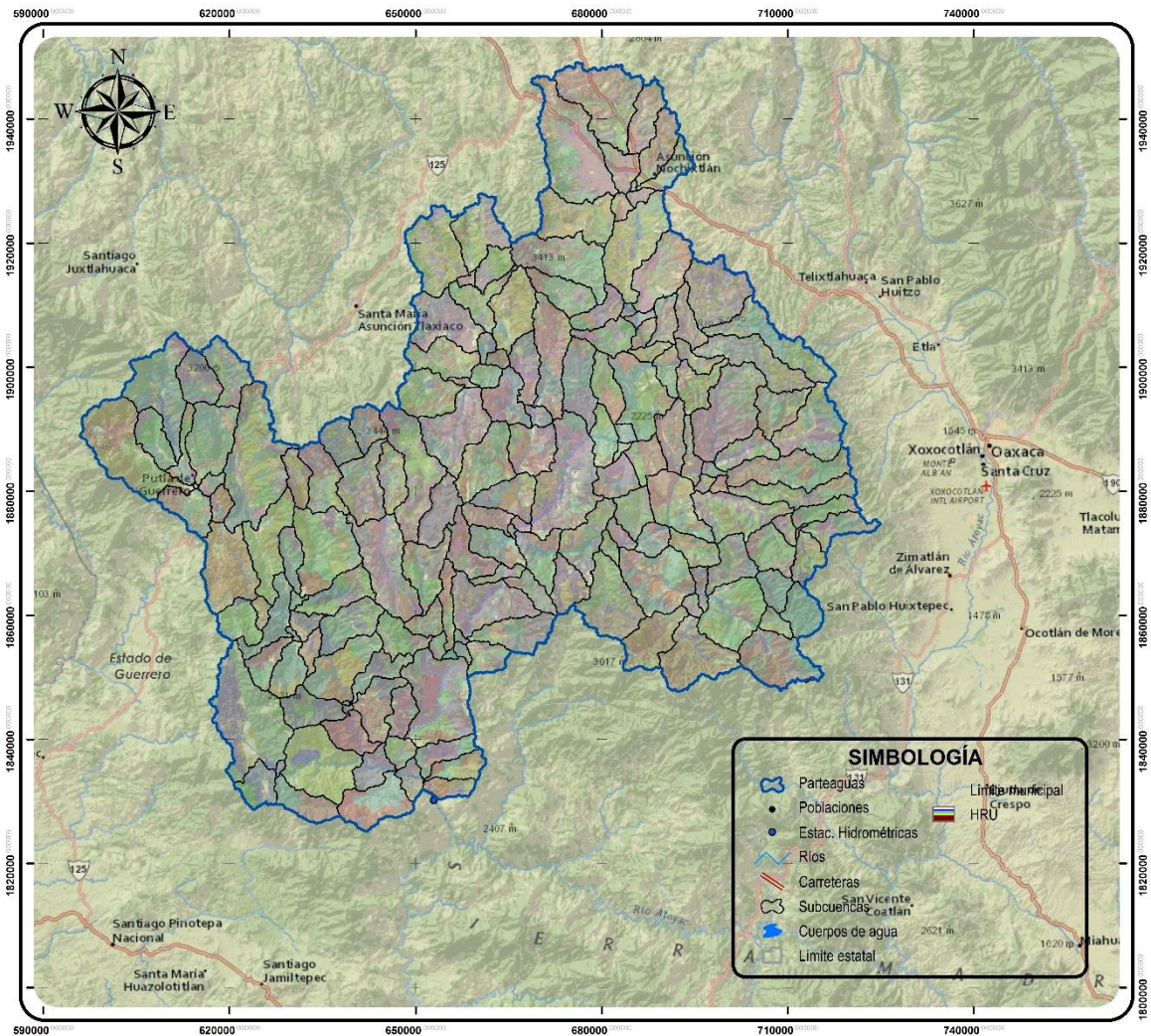


Figura 37. Unidades de respuesta hidrológica y subcuencas producto de la delimitación de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

## 6.2. Calibración del modelo

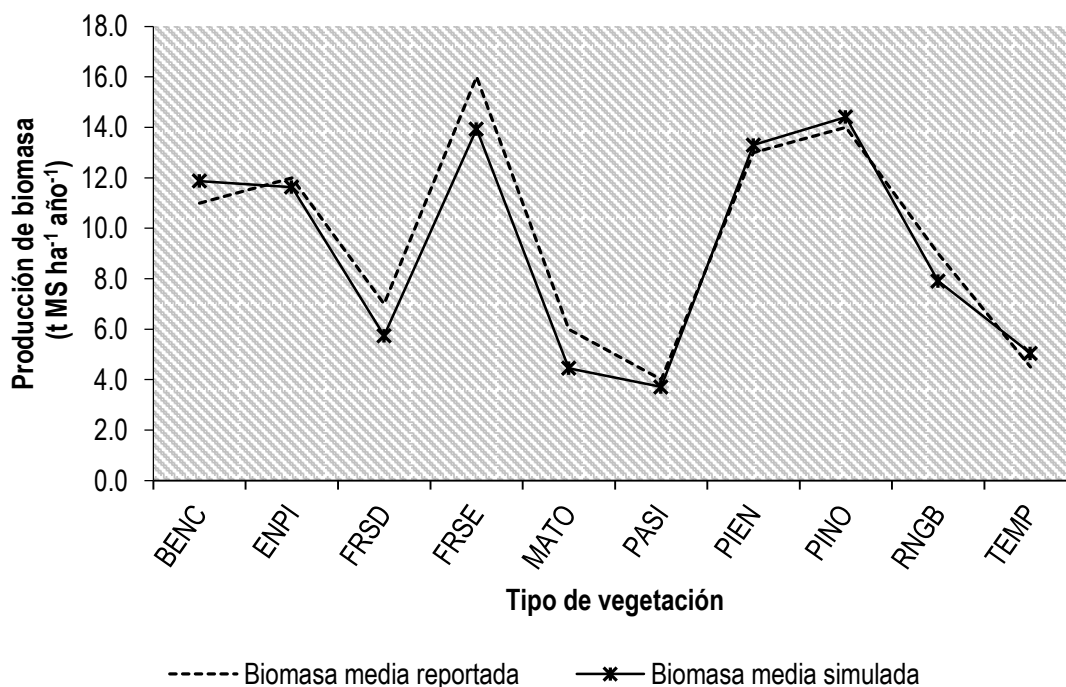
### 6.2.1. Calibración anual de la biomasa

La calibración se efectuó anualmente, por un periodo de 10 años (1976-1985), obteniendo un buen ajuste. Como puede observarse en el Cuadro 28 la mayoría de los valores de biomasa quedaron dentro del rango reportado por la literatura.

**Cuadro 28.** Biomasa reportada y simulada por el modelo para las diferentes especies vegetales presentes en la cuenca.

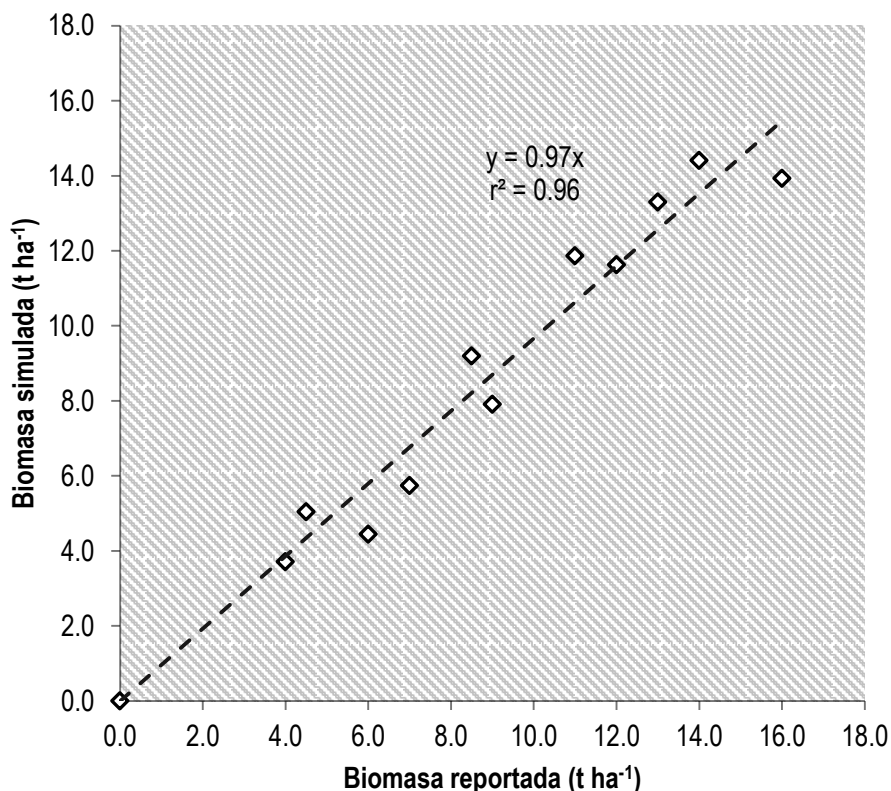
Clave	Uso de suelo y vegetación	Biomasa reportada (t MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )			Biomasa simulada (t MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
		Mínimo	Promedio	Máximo	
BENC	Bosque de encino	10	11	12	11.9
ENPI	Bosque de encino-pino	11	12	13	11.6
FRSD	Selva baja caducifolia	5	7	9	5.7
FRSE	Bosque mesófilo de montaña	14	16	18	13.9
MATO	Chaparral	5	6	7	4.5
PASI	Pastizal inducido	3	4	5	3.7
PIEN	Bosque de pino-encino	12	13	14	13.3
PINO	Bosque de pino	13	14	15	14.4
RIEG	Agricultura de riego	7	8.5	10	9.2
RNGB	Bosque de táscate	8	9	10	7.9
TEMP	Agricultura de temporal	3	4.5	6	5.0

Como se puede observar en la Figura 38, para el bosque mesófilo de montaña, la selva baja caducifolia, el chaparral y el bosque de táscate el modelo subestimó de manera leve (20 %) la producción de biomasa.



**Figura 38.** Producción de biomasa anual reportada (Salas *et al.*, 2014) y simulada por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En la Figura 39 se muestra, a través de un análisis de regresión lineal, la relación que guarda la biomasa observada con la simulada por SWAT. Al forzar la línea de regresión al origen, se obtuvo un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.96 y una pendiente de la línea de 0.97. Esto nos indica que SWAT estimó muy bien la biomasa (subestimación del 3 %) dentro de la cuenca.



**Figura 39.** Relación entre biomasa reportada (Salas *et al.*, 2014 y simulada por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.2.2. Calibración de los caudales medios anuales

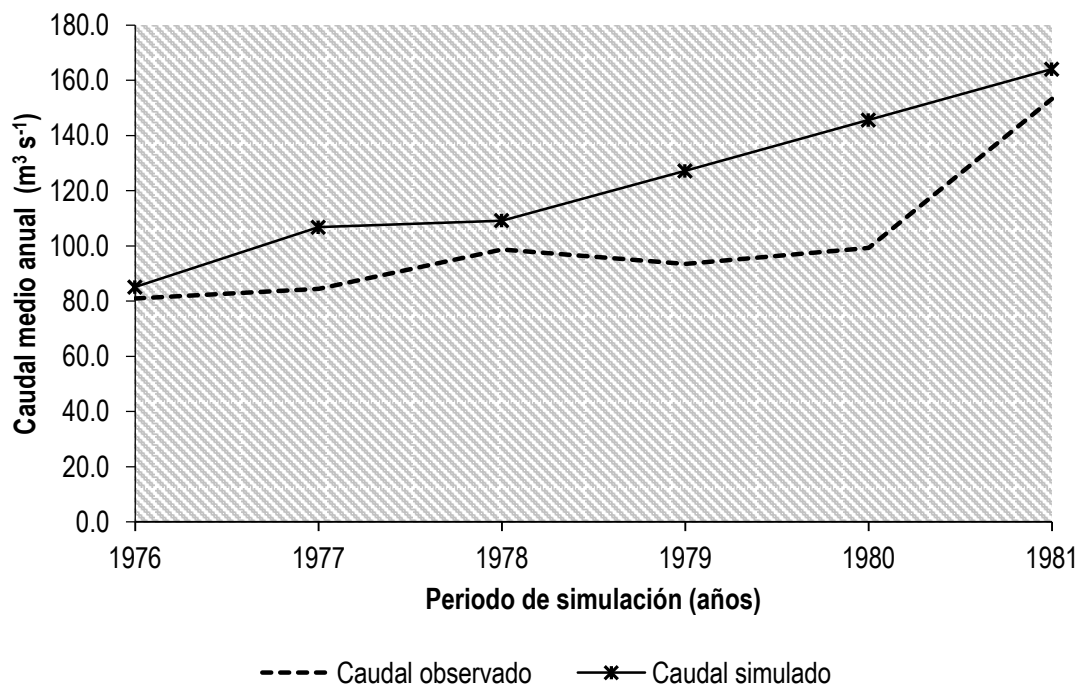
El periodo utilizado para calibrar escurrimientos fue de 1975 a 1981 (7 años), tomando al año 1975 para entrenamiento. En el Cuadro 29, para el periodo de calibración, se muestran los caudales medios anuales simulados por el modelo.

**Cuadro 29.** Caudales medios anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Año	Caudal observado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Caudal simulado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1975	111.86	---
1976	80.98	85.09

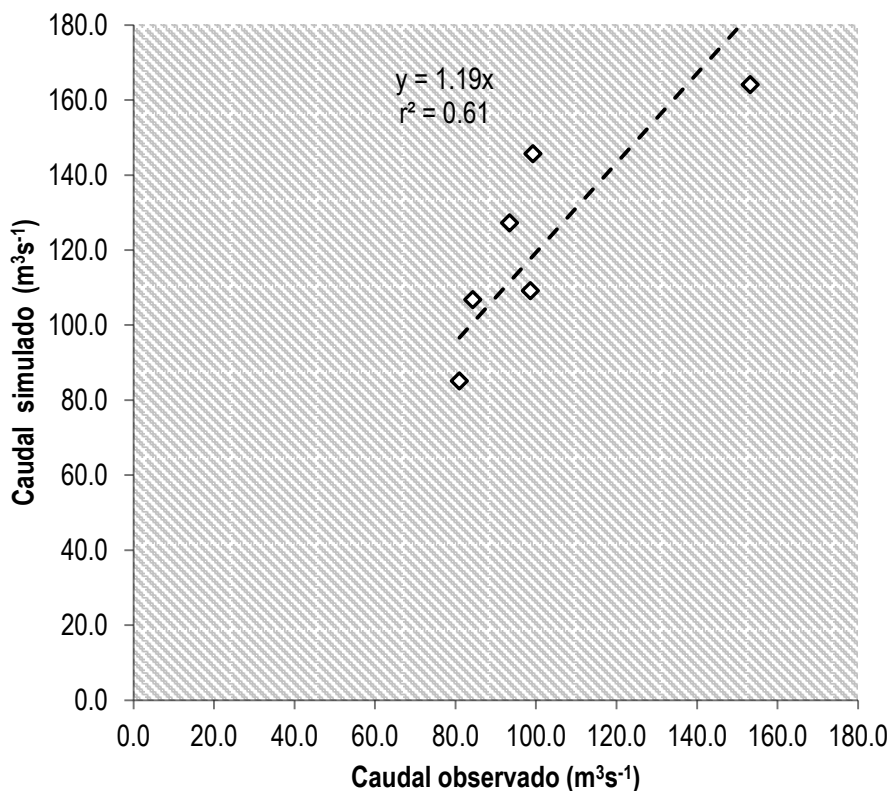
Año	Caudal observado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Caudal simulado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1977	84.38	106.76
1978	98.67	109.13
1979	93.45	127.2
1980	99.27	145.63
1981	153.29	164.04
Promedio	103.13	122.98

Como se puede observar en la Figura 40 el modelo sobreestimó los caudales en todos los años, como se verá más adelante, obedece a que SWAT sobreestimó los caudales en el periodo de lluvias.



**Figura 40.** Caudales medios anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

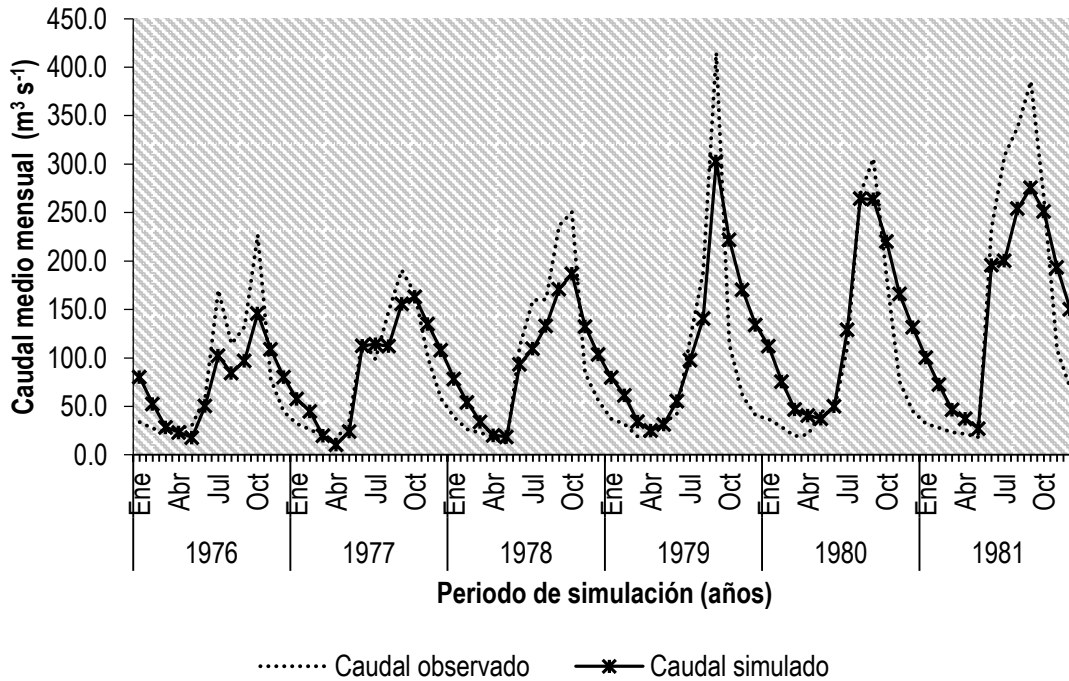
Los estimadores de la eficiencia del modelo arrojan valores de  $r^2=0.61$  y  $NSE =0.65$ , este último, de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007) indica que los valores simulados, respecto a los aforos medios anuales, son adecuados. Por otro lado, la pendiente de la línea de regresión, igual a 1.19, indica una sobreestimación global del 19 % sobre los caudales aforados en la estación hidrométrica (Figura 41).



**Figura 41.** Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.2.3. Calibración mensual de los escurrimientos

El periodo utilizado para la calibración mensual del caudal fue de 1975 a 1981 (7 años); el primer año se tomó para el entrenamiento del modelo; principalmente para ajustar la humedad del suelo al inicio del periodo de calibración. La Figura 42 se muestra, en forma mensual, los caudales medidos y los simulados por SWAT. Se observa que el modelo sobreestimó los caudales durante el periodo de lluvias; entre los meses de julio y octubre.



**Figura 42.** Caudales mensuales, observados y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Los estimadores de eficiencia del modelo arrojan valores de  $r^2=0.84$  y  $NSE=0.83$ , este último, de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007) se consideran adecuados los caudales simulados. Por otro lado, la pendiente de la línea de regresión, igual a 1.08, indica que SWAT tuvo una sobreestimación global del 8 % respecto a los caudales medios mensuales aforados en la estación hidrométrica Ixtayutla (Figura 43).

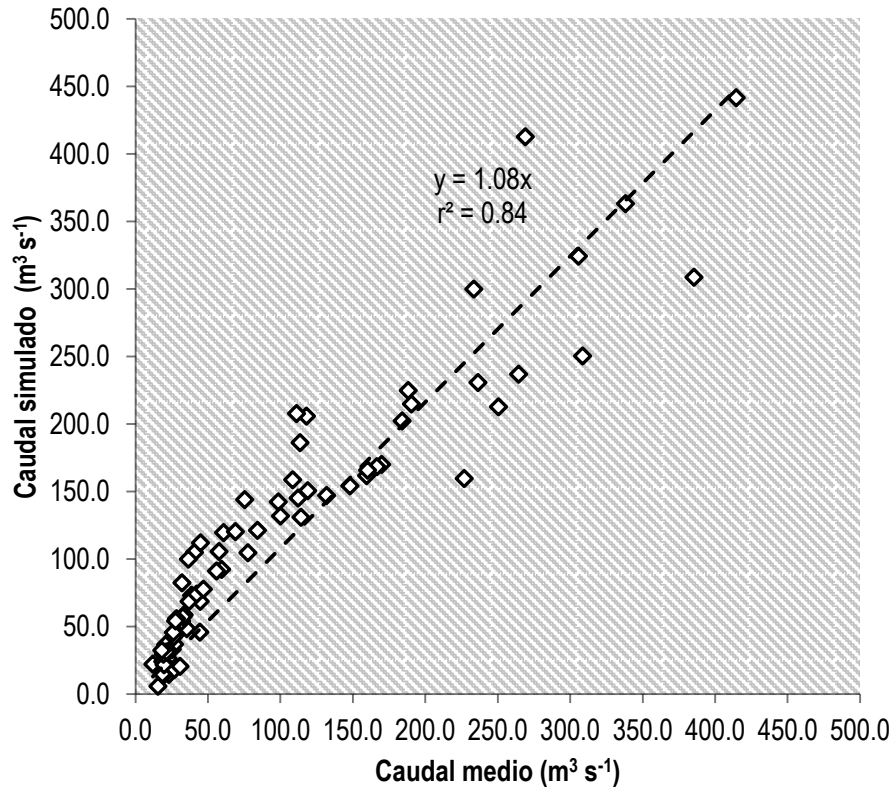
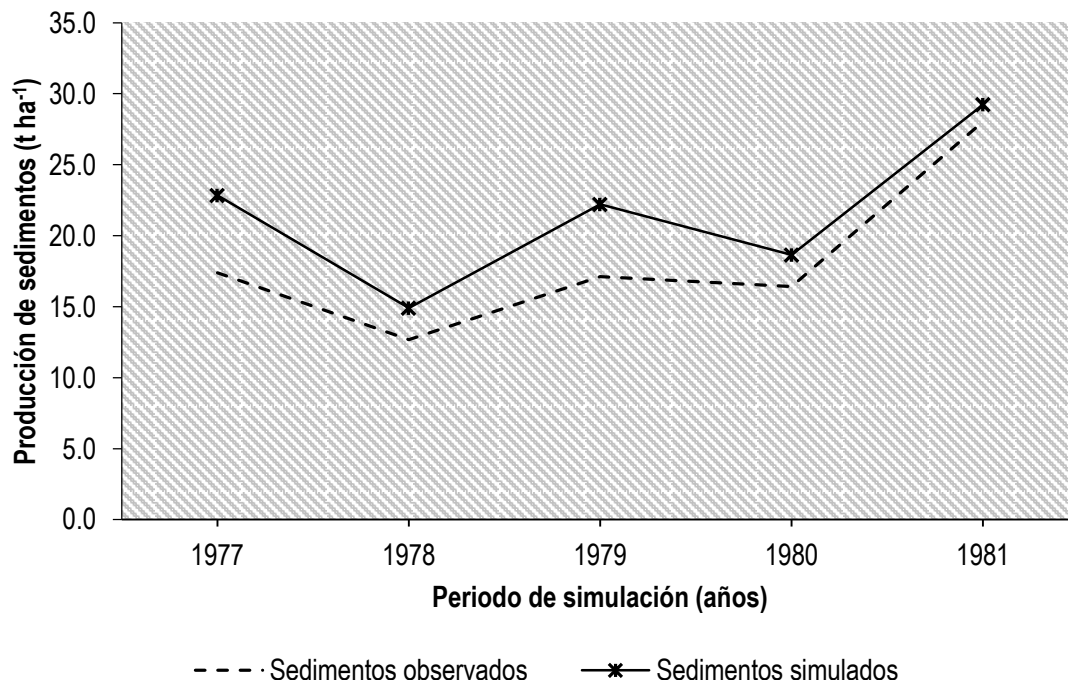


Figura 43. Relación entre caudales mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

#### 6.2.4. Calibración anual de sedimentos

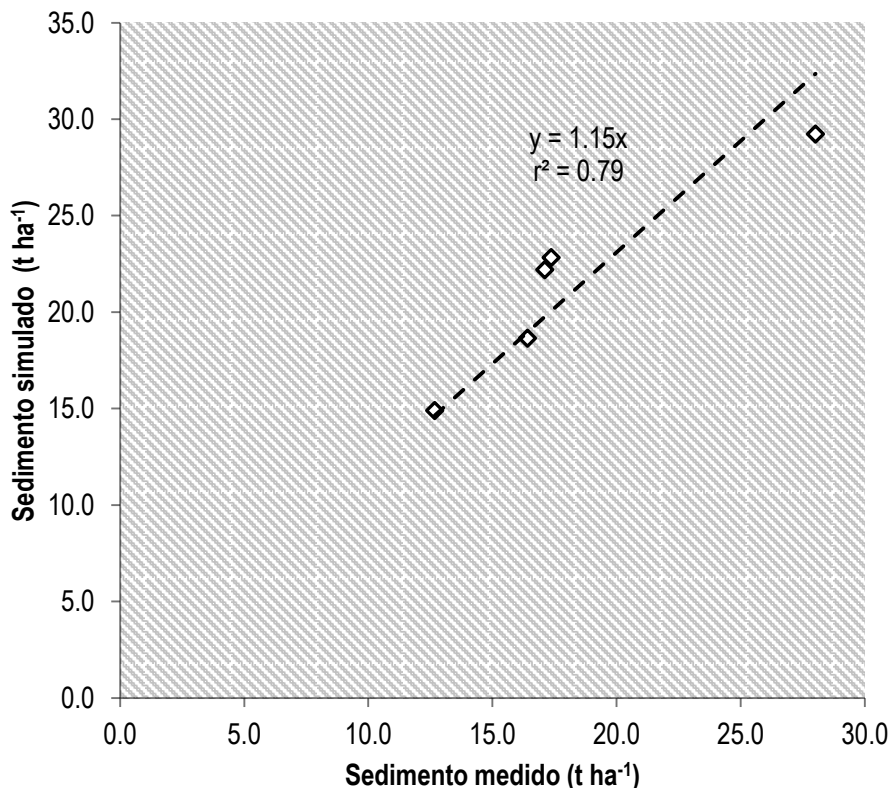
La calibración de sedimentos se efectuó para el periodo de 1977 a 1981, tomando el año de 1976 para entrenamiento. En la Figura 44 se muestra la dinámica y la magnitud de la producción anual de sedimentos medidos y simulados por SWAT. Se observa, durante los años analizados, que el modelo consistentemente sobreestimó la producción de anual de sedimentos.



**Figura 44.** Producción anual de sedimentos, observados y simulados por SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

Con el propósito de conocer la capacidad predictiva del modelo, en la Figura 45 se presenta el análisis de regresión entre datos observados y simulados por el modelo SWAT. Los resultados muestran, para una línea de regresión de 1.15, que el modelo sobreestimó en 15 % los valores observados. Asimismo se observa, con un  $r^2$  de 0.79, que el modelo alcanzó una muy buena simulación de la producción anual de sedimentos para la cuenca.

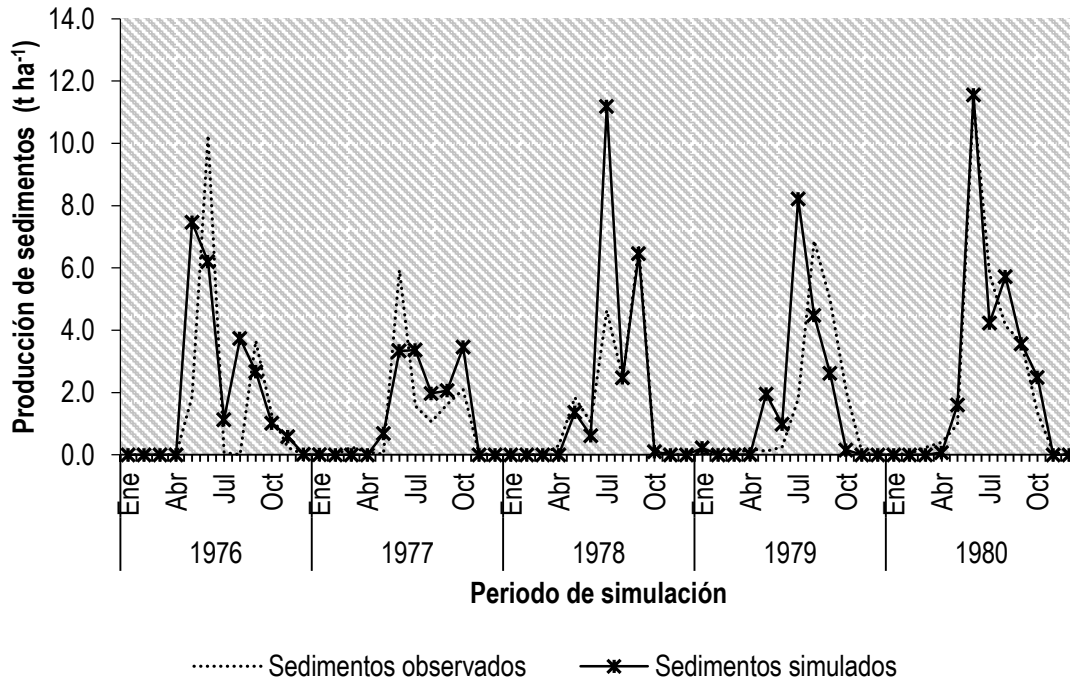




**Figura 45.** Relación entre sedimentos medios anuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.2.5. Calibración mensual de sedimentos

La calibración mensual de sedimentos se hizo para el periodo de 1977 a 1981, tomando el año de 1976 para entrenamiento. En la Figura 46 se muestra la dinámica y la magnitud de la producción mensual de sedimentos medidos y simulados por SWAT. Se observa que el modelo sobreestimó la producción de sedimentos de la cuenca al inicio del periodo de lluvias, principalmente en los meses de mayo, junio y julio.



**Figura 46.** Producción mensual de sedimentos, observados y simulados por el modelo SWAT durante la calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

La Figura 47 muestra el análisis de regresión, entre los sedimentos medidos y los simulados por SWAT, para conocer la capacidad predictiva del modelo. La pendiente de la línea de regresión, igual a 0.93, indica que el modelo subestimó en 7 % la producción mensual de sedimentos. Por otro lado, el coeficiente de determinación,  $r^2 = 0.59$ , confirma que SWAT alcanzó un buen ajuste respecto a los valores medios mensuales observados en la estación hidrométrica Ixtayutla.

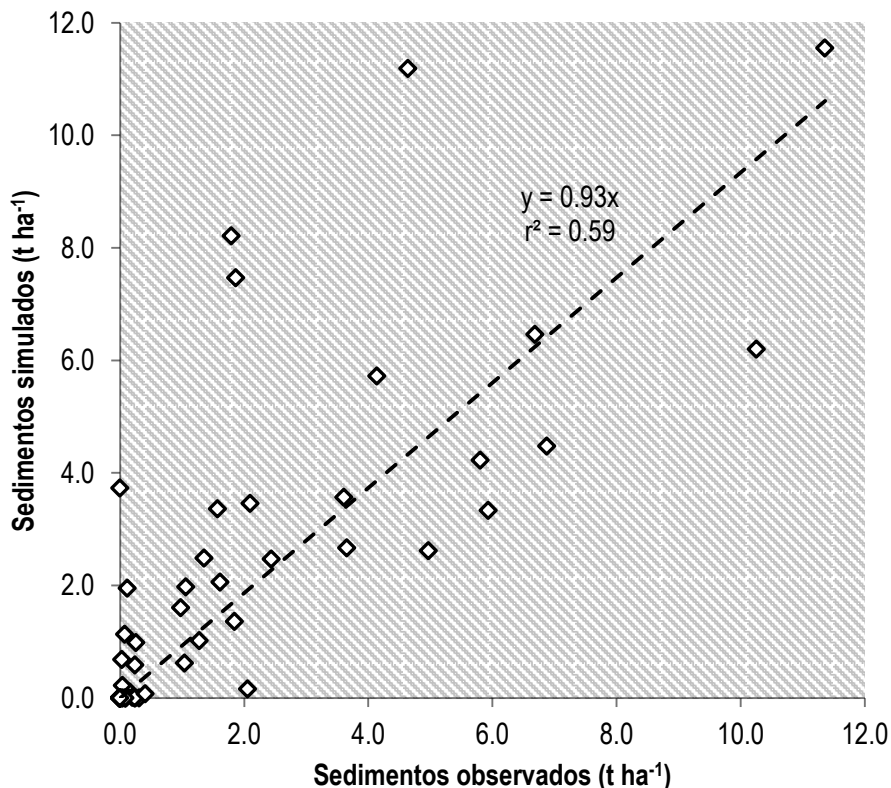


Figura 47. Relación entre sedimentos mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su calibración, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.2.6. Eficiencia del modelo durante la calibración

Una manera de determinar si el modelo o los datos presentaron errores sistemáticos es a través del coeficiente de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este coeficiente es semejante al de determinación y su cálculo parecido, aunque no son iguales. Para estimar este indicador se utilizó la Ecuación 9 y mediante el Cuadro 2 se asignó a cada análisis la calidad de su ajuste. De este modo, se obtuvo que solo en la calibración de los caudales medios mensuales se alcanzó un ajuste excelente, con valor de 0.83. En contraste, el menor ajuste fue para los sedimentos medios anuales, con un valor de 0.49, el cual se considera como bueno. El Cuadro 30 resume los parámetros que miden, para la etapa de calibración, la eficiencia predictiva del modelo SWAT.

Cuadro 30. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante su calibración.

Periodo	Variable	Desv. Est. Medidos	Desv. Est. Simulados	r <sup>2</sup>	Pendiente de la regresión	NSE	Ajuste
Anual	Biomasa	4.69	4.68	0.96	0.97	0.95	Excelente
Anual	Escorrentamiento (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	26.36	27.01	0.61	1.19	0.65	Muy bueno



Periodo	Variable	Desv. Est. Medidos	Desv. Est. Simulados	r <sup>2</sup>	Pendiente de la regresión	NSE	Ajuste
Mensual	Sedimentos (t ha <sup>-1</sup> )	5.74	5.33	0.79	1.15	0.49	Bueno
	Escorrentamiento (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	98.30	98.16	0.84	1.08	0.83	Excelente
	Sedimentos (t ha <sup>-1</sup> )	2.54	2.75	0.59	0.93	0.51	Bueno

Desv. Est: Desviación Estándar

NSE: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

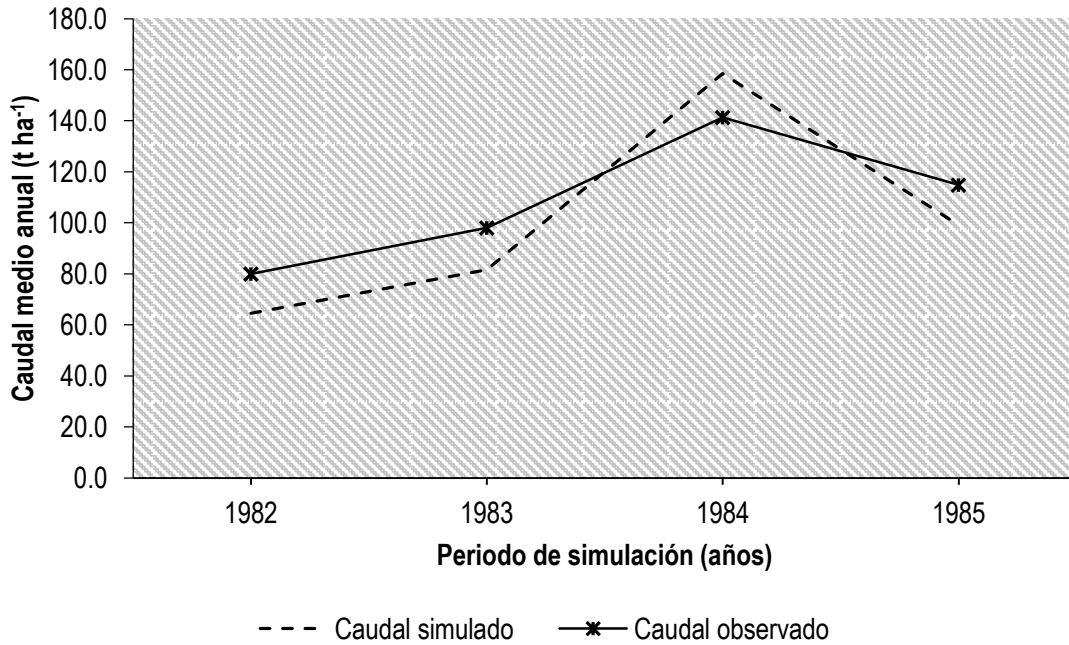
El Cuadro 30 se observa que la desviación estándar entre valores observados y simulados, para la mayoría de las variables analizadas, fue muy semejante. Esto indica que la simulación de SWAT tuvo un comportamiento temporal similar al de los datos observados. En términos generales, se observa que SWAT presentó mayor capacidad predictiva para estimar la producción de agua sobre la producción sedimentos. Finalmente, contrario a lo que reporta la literatura (Salas *et al.*, 2014 y Ramírez, 2014) en este trabajo se encontró una mayor correlación para escurrimientos mensuales que para anuales.

### 6.3. Validación del modelo

En este apartado se presentan los escurrimientos y sedimentos simulados por el modelo SWAT, entre 1982 a 1985, sin ajuste de ningún parámetro y cambiando únicamente los datos climáticos propios de este periodo.

#### 6.3.1. Validación de los caudales medios anuales

En la Figura 48 se muestra, para los periodos de calibración y validación, la distribución y magnitud de los caudales medios anuales, observados y simulados por SWAT. En esta figura se observa que en 1982 y 1983, contrario a lo registrado en 1984, los escurrimientos simulados fueron mayores a los aforados.



**Figura 48.** Escurremientos anuales, observados y simulados por SWAT durante su calibración (1977-1981) y validación (1982-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En la Figura 49 se muestra la comparación, a través de un análisis de regresión lineal, entre caudales medios anuales observados y simulados por SWAT durante la validación. Del análisis se obtuvo, para una pendiente de la línea igual a 1.03, una sobreestimación de los aforos del 3 %. Asimismo se obtuvo un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.67 el cual, aunque muy bajo para una comparación anual, se considera aceptable.

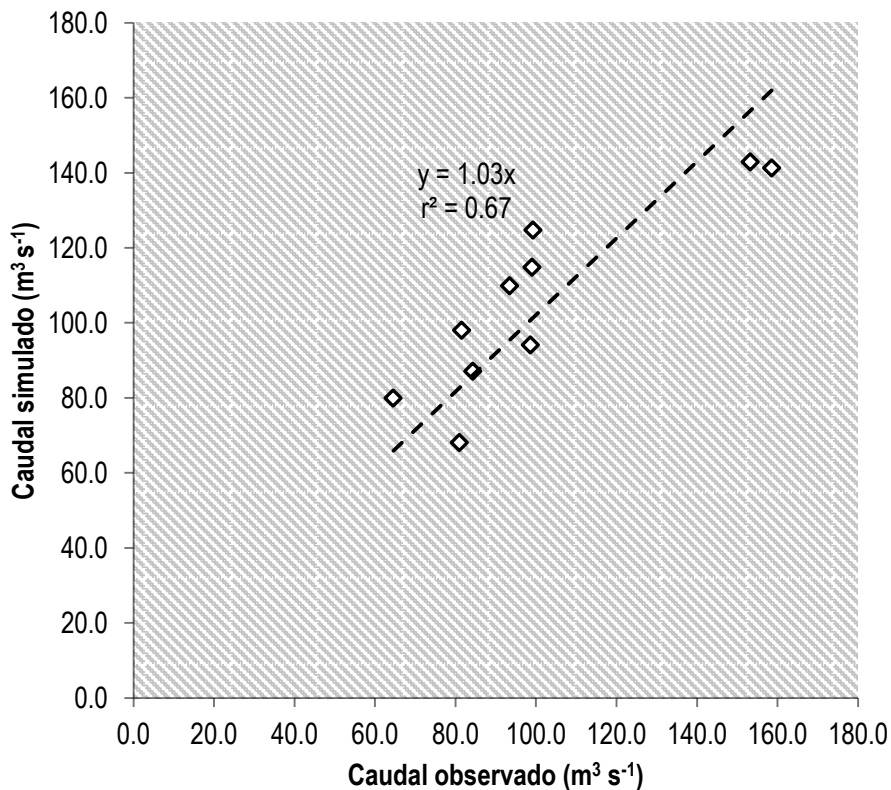
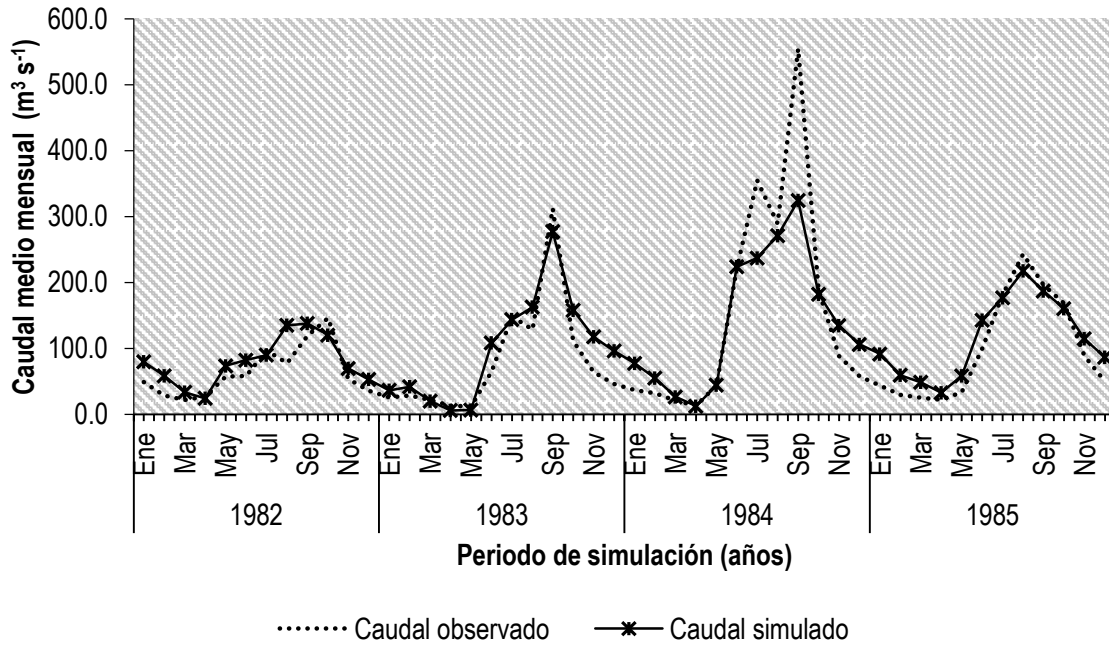


Figura 49. Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.3.2. Validación mensual de los escurrimientos

En la Figura 50 se muestra, en forma mensual, los caudales medidos y los simulados por SWAT durante la validación. Se observa que en esta etapa el modelo siguió prediciendo de forma satisfactoriamente los caudales medios mensuales, a reserva del año de 1984 donde estos se subestimaron.



**Figura 50.** Caudales mensuales, observados y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En la Figura 51 se muestra, a través de análisis de regresión lineal, la relación que guardan los escurrimientos mensuales observados y simulados con SWAT durante la validación. Del análisis se obtuvo una pendiente de la recta de 0.86, menor a la unidad, lo que indica que el modelo subestimó en 14 % el escurrimiento. Por otro lado, se obtuvo un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.70, por cierto mayor al anual, lo que implica un muy buen ajuste entre los escurrimientos mensuales observados y simulados.

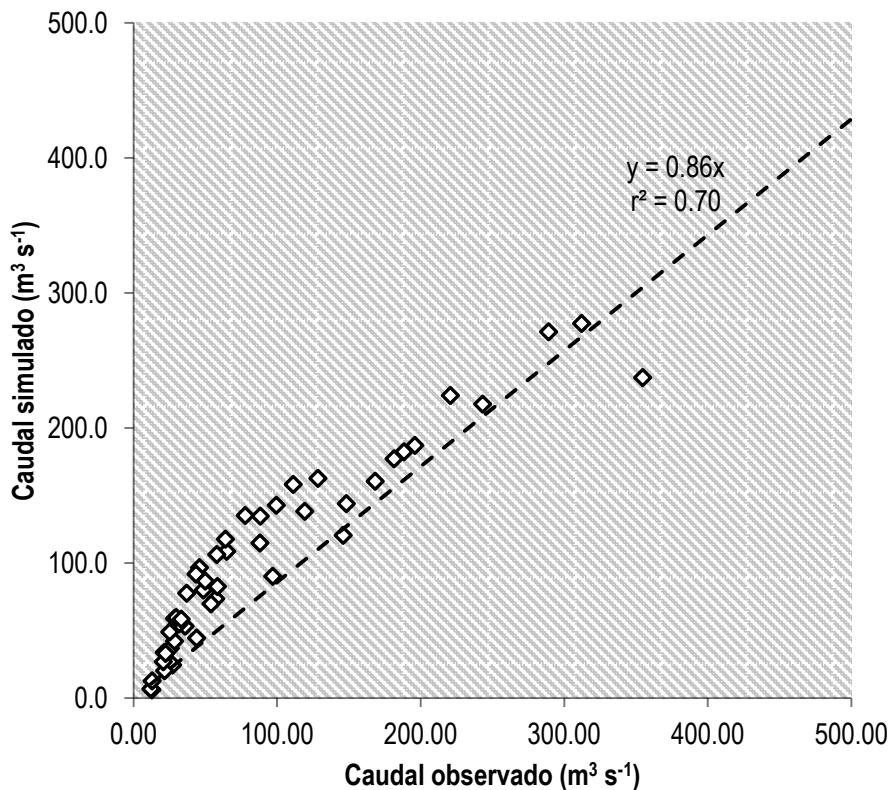
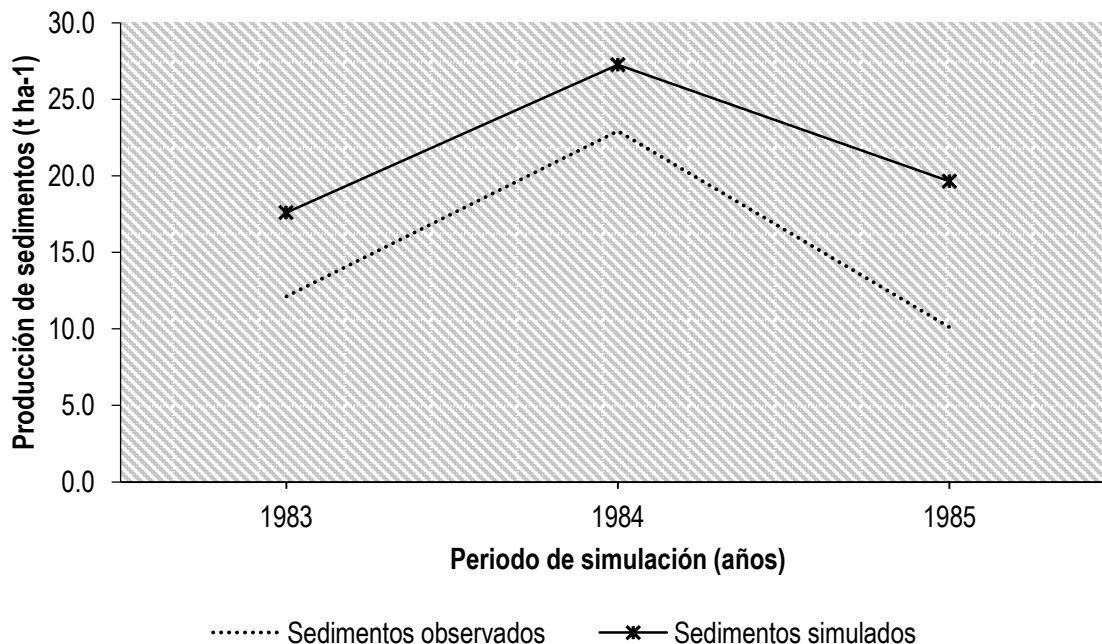


Figura 51. Relación entre caudales mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.3.3. Validación anual de los sedimentos

En la Figura 52 se muestra el comportamiento anual de la producción de sedimentos, observados y simulados, durante la validación del modelo SWAT (1983-1985). En la validación, al igual que la etapa de calibración, se observa que los valores simulados también fueron superiores a los observados.





**Figura 52.** Producción anual de sedimentos, observados y simulados por SWAT durante su validación (1983-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En la Figura 53 se muestra la regresión lineal entre los datos medidos y simulados de producción de sedimentos para el periodo de validación. Los resultados muestran, para una línea de regresión de 1.21, que el modelo sobreestimó en 21 % los valores observados. Asimismo se observa, con un  $r^2$  de 0.84, que el modelo alcanzó una muy buena simulación de la producción anual de sedimentos para la cuenca.

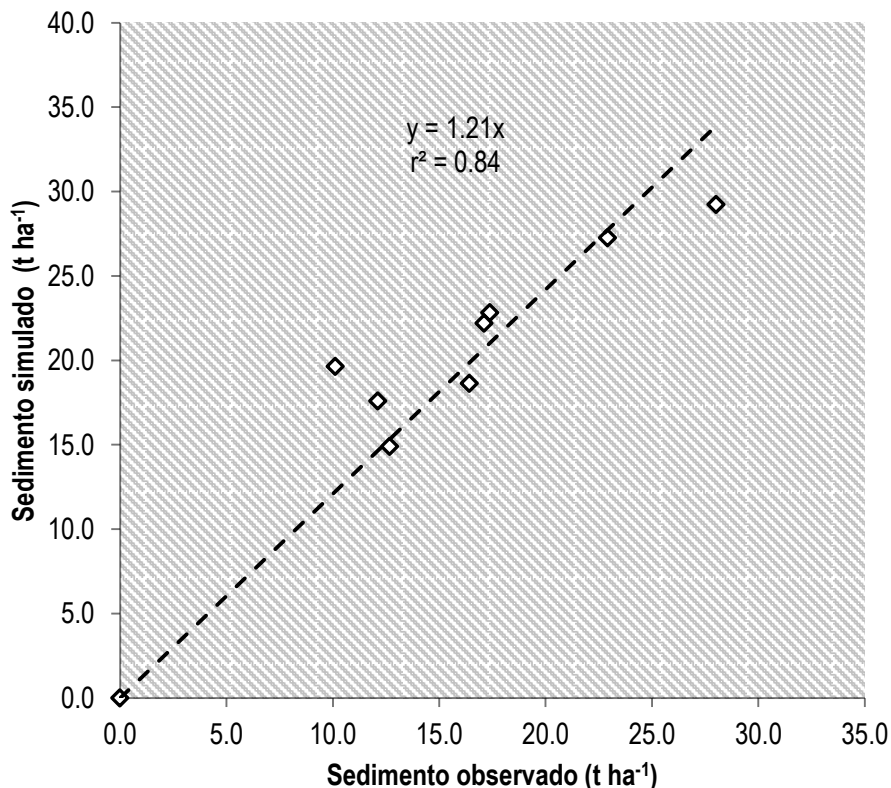
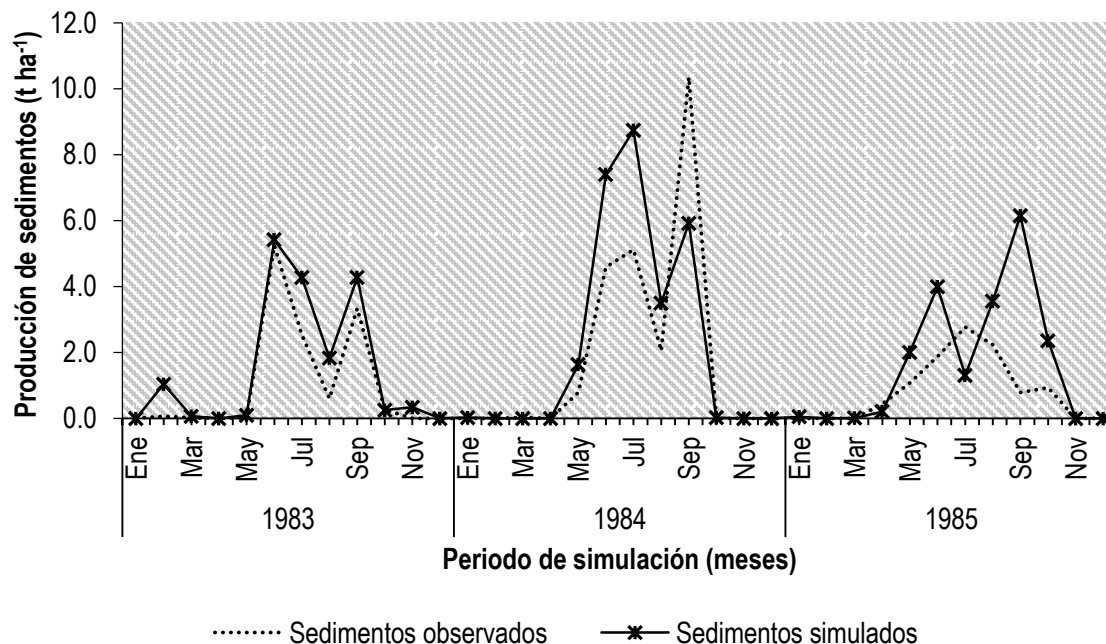


Figura 53. Relación entre sedimentos medios anuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

#### 6.3.4. Validación mensual de los sedimentos

En la Figura 54 se muestra la dinámica y la magnitud de la producción mensual de sedimentos medidos y simulados por SWAT. Se observa que el modelo sobreestima la producción de sedimentos sobre todo al inicio del periodo de lluvias, principalmente en los meses de mayo, junio y julio.



**Figura 54.** Producción mensual de sedimentos, observados y simulados por el modelo SWAT durante la validación (1983-1985), cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

En la Figura 55 se muestra el análisis de regresión, entre los sedimentos medidos y los simulados por SWAT, para conocer la capacidad predictiva del modelo. La pendiente de la línea de regresión, igual a 1.05, indica que el modelo sobreestimó en 5 % la producción mensual de sedimentos. El coeficiente de determinación,  $r^2 = 0.58$ , menor que a nivel anual, confirma que SWAT alcanzó un ajuste aceptable respecto a los valores medios mensuales observados en la estación hidrométrica Ixtayutla.

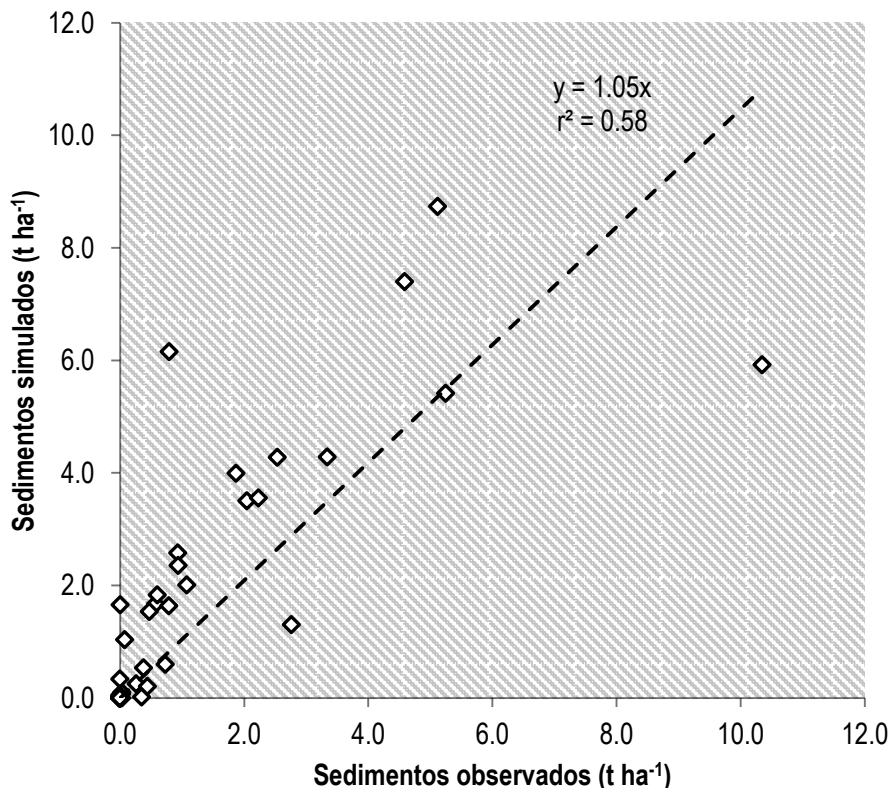


Figura 55. Relación entre sedimentos mensuales medidos y simulados por el modelo SWAT durante su validación, cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

### 6.3.5. Eficiencia del modelo durante la validación

En el Cuadro 31 se resumen los valores anuales y mensuales de desviación estándar,  $r^2$ , pendiente de regresión e índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe para la validación de caudales y sedimentos simulados por SWAT para la estación hidrométrica Ixtayutla (clave CONAGUA: 21,021).

Cuadro 31. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante su validación.

Periodo	Variable	Desv. Est. Medidos	Desv. Est. Simulados	$r^2$	Pendiente de la regresión	NSE	Ajuste
Anual	Escorrentamiento ( $m^3 s^{-1}$ )	29.56	24.92	0.61	1.02	0.75	Muy bueno
	Sedimentos ( $t ha^{-1}$ )	7.96	8.50	0.84	1.21	0.47	Bueno
Mensual	Escorrentamiento ( $m^3 s^{-1}$ )	107.44	76.15	0.7	0.86	0.81	Excelente
	Sedimentos ( $t ha^{-1}$ )	2.30	2.52	0.58	1.05	0.45	Bueno



Durante la validación el modelo SWAT predijo, con un NSE de 0.75, muy bien los escurrimientos anuales. Sin embargo, contrario a lo que se esperaba, el modelo predijo de mejor forma el escurrimiento mensual (NSE=0.8, excelente). Para la producción de sedimentos anual y mensual, según sus valores de NSE, las simulaciones durante la validación se consideran como buenas y, comparadas con los escurrimientos, más estables. En el Cuadro 31 se observa que la desviación estándar entre valores observados y simulados, para la mayoría de las variables analizadas, fue muy semejante, excepto para los escurrimientos mensuales. Esto indica que SWAT mantuvo un buen desempeño durante los tres años adicionales que duró la validación.



## 7. CONCLUSIONES

El modelo SWAT simuló de manera excelente ( $NSF_{\text{calibración}} = 0.95$  y  $r^2_{\text{calibración}} = 0.96$ ) la producción anual de biomasa para las diferentes especies vegetativas presentes en la cuenca del río Mixteco.

En la cuenca del río Sordo SWAT simuló de manera excelente ( $NSF_{\text{calibración}} = 0.81$ ,  $NSF_{\text{validación}} = 0.81$ ) y muy buena ( $NSF_{\text{calibración}} = 0.65$ ,  $NSF_{\text{validación}} = 0.75$ ) la producción mensual y anual de escurrimientos, respectivamente. Es decir, el modelo simuló de mejor forma los escurrimientos mensuales ( $r^2_{\text{calibración}} = 0.84$  y  $r^2_{\text{validación}} = 0.7$ ) que los anuales ( $r^2 = 0.61$  para calibración y validación).

En la cuenca del río Sordo SWAT simuló de buena manera la producción anual ( $NSF_{\text{calibración}} = 0.49$ ,  $NSF_{\text{validación}} = 0.47$ ) y mensual ( $NSF_{\text{calibración}} = 0.51$ ,  $NSF_{\text{validación}} = 0.45$ ) de sedimentos. Contrario a los escurrimientos, el modelo simuló de mejor forma los sedimentos anuales ( $r^2_{\text{calibración}} = 0.79$  y  $r^2_{\text{validación}} = 0.84$ ) que los mensuales ( $r^2_{\text{calibración}} = 0.59$  y  $r^2_{\text{validación}} = 0.58$ ).

En general, el modelo SWAT estimó en forma aceptable la producción de agua y sedimentos de la cuenca del río Sordo.

El modelo simula de mejor forma la producción de agua que la de sedimentos y se desempeña de una mejor manera durante su calibración que durante su validación.

En términos generales el modelo SWAT se calibró y validó satisfactoriamente en la cuenca del río Sordo, por lo que, su aplicación es ampliamente recomendable para realizar evaluaciones hidrológicas y tomar decisiones de manejo ambiental.

## 8. RECOMENDACIONES

Con la herramienta SWAT CUP se facilitó el trabajo de la calibración del flujo superficial, por lo que su uso se recomienda en posteriores estudios.

Se deben realizar estudios de uso de suelo y vegetación a mayor detalle, a fin de definir alternativas de manejo, ya que una cobertura según el uso potencial, reduce la producción de sedimentos, pero afecta notablemente la producción de agua.

Utilizar el modelo SWAT y las bases desarrolladas en el presente estudio para evaluar el impacto que provoca la pérdida de cobertura sobre las características del suelo.

Rehabilitar la estación hidrométrica Ixtlayutla con el fin de validar la cuenca para periodos más recientes.



## 9. LITERATURA CITADA

Arnold, J.G.; Allen, P.M.; Muttiah, R.; and Bernhardt, G. 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground water*. 33(6):1010-1018.

Arnold, J.G.; Kiniry, J. R.; Srinivasan, R.; Williamas, J. R.; Haney, E. B.; and Neitsch, S. L. 2012b. Soil and water assessment tool: Input-Output documentations version 2012b. Texas Water Resources Institute. 654 p.

Arnold, J. G.; Moriasi, D. N.; Gassman, P. W.; Abbaspour, K. C.; White, J. J.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensven, A.; Van Liew, M. W.; Kannan, N.; and Jha, M. J. 2012a. Swat: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 55 (4):1491-1508.

BANDAS. 2008. Comisión Nacional del Agua. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm> (Consultado abril de 2015).

Campos, A. D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª edición. Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, México. 22-23 pp.

CFSR. 2015. Climate forecast system reanalysis. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Global Wheater Data for SWAT. Sitio web: <http://globalweather.tamu.edu/> (Consultado abril de 2015).

Chu, T. W. and Shirmohammadi, A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the Piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE*. 47(5):1057-1073.

CONAGUA. 2012. Atlas del Agua México. Sistema Nacional de Información del Agua. Subdirección General Técnica. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html> (Consultado abril de 2015).



Eckhardt, K. and Arnold J, G. 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology* 251:103-109.

Eterovic, R. J. M. 2008. Aplicación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres naturales en cuencas de Venezuela. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

FAO. 2013. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Depósito de documentos de la FAO. Departamento de desarrollo sostenible. Food and Agricultural Organization. Sitio web: <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s04.htm> (Consultado abril de 2015).

Gupta, V. K. and Sorooshian, S. 1985. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrological models. *Journal Hydrologic* 81:57-77.

Hammerly, R. C. 2006. Modelación hidrológica con SIG: contribuciones en su difusión y aplicación. Universidad Nacional del Litoral Santa Fe. 1ª edición. Editorial UNL. Universidad Nacional del Litoral Santa Fe, Santa Fe Argentina. 40 p.

Her, Y.; Fankenberger, J.; Chaubey, I.; and Srinivasan, R. 2015. Threshold effects in HRU definition of the soil and water assessment tool. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 58(2):367-378.

INEGI. 1980. Carta Geológica serie II, escala 1:250 000 (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México. Sitio web: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescala.aspx#> (consultado abril de 2015).

INEGI. 2000. Datos vectoriales de unidades climáticas escala 1:1 000 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. Sitio web:





<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/clima/infoescala.aspx>  
(consultado abril de 2015).

INEGI. 2006. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250 000 serie II (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México. Sitio web: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial\\_serieii.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx) (Consultado abril de 2015).

INEGI. 2012. Continental - Continúo de elevaciones mexicano, CEM. Modelo digital de elevaciones escala 1:50 000. Versión 3.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México. Sitio web: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx> (consultado abril de 2015).

INEGI. 2015. Datos vectoriales de subprovincias fisiográficas escala 1:1 000 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, México. Sitio web: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/fisiografia/infoescala.aspx#> (Consultado abril de 2015).

Magaña, R. V. y Ambrizzi T. 2005. Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters. *Atmósfera* 18: 211-234.

Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Binger, R. L.; Harmel, R. D.; and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*. 50(3):885-900.

Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I a discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.

Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; and Williams, J.R. 2011. Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report no. 406. Texas A&M University system. College station, Texas. 618 p.



Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; and Williams, J. R. 2002. Soil y water assessment tool swat user's manual version 2000. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. Temple, TX. 472 p.

Neprash technology. 2012. SWAT CUP Versión 5.1.6.2. Sitio web: <http://www.neprashtechology.ca/Downloads.aspx> (consultado abril de 2015).

Peterson, J. R. and Hamlet, J. M. 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. Journal of the American Water Resources Association 34(3):531-544.

Ramírez, C. H.; Martínez, M. M. R.; González, G. M. J.; Romero, M. A.; y Luna, C. M. 2014. Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del pacífico sur. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Montecillos, México. 224 p.

Refsgaard, J. and Knudsen, J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resources Research 32(7): 2189-2202.

Rivera, T. F.; Pérez, N. S.; Ibáñez, C. A.; y Hernández, S. R. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Agrociencias. 46(2):101-105.

Röder, J. G.; Villavicencio, R.; y Zarazúa, P. 2006. Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo "USLE" en SIG para estimar el riesgo potencial de erosión en el área protegida "Sierra de Guila" XVII Sistema de la investigación científica. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Zapopan, Jalisco. Artículo. 7 p.

Salas, M. R.; Ibáñez, C. L. A.; Arteaga, R. R.; Martínez, M. R. M.; y Fernández, R. D. S. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. México. Agrociencia. 48(1):1-15.

Salas, M. R. 2013. Modelado Hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. Tesis de maestría. Ingeniería Agrícola y Uso



Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 134 p.

Salgado, R. J. H. y Güitrón de los Reyes D. A. 2012. Aplicabilidad de los Modelos Hidrológicos Distribuidos. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, México. 5 p.

Santhi, C.; Arnold, J. G.; William, J. R.; Dugas, W. A.; Srinivasan, R.; and Hauck, L. M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with points and nonpoint sources. *Water Resources Association*. 37:1169-1188.

SEMARNAT y CP. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250 000. Memoria nacional 2001-2002. México.

Shen, Z. Y.; Chen, L.; and Chen T. 2011. Analysis of parameter uncertainty in hydrological modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrologic Earth Syst. Sci. Discuss.* 8(4):8203-8229.

SMN. 2010. Base de datos climática nacional. Sistema de Información Climática Computadorizada (CLICOM). Servicio Meteorológico Nacional. Sitio web: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>. (Consultado abril 2015).

SMN. 2012. Base de datos de ciclones tropicales que impactaron a México de 1970 a 2011. Subgerencia de pronóstico meteorológico. Servicio meteorológico nacional.

Torres, B. E.; Fernández, R. D. S.; Oropeza, M. J. L.; y Mejía, S. E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca el Tejocote, Atlacomulco, Estado de México, México. *TERRA—Terra Latinoamericana*. 22(4):437-444.

Van Liew, M. W.; Arnold, J. G.; and Garbrecht J. D. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE*. 46:1539-1551.



Wu, K. and Johnston, C. A. Hydrologic response to climate variability in a Great Lakes Watershed: a case study with the SWAT model. *Journal of Hydrology*. 337(1):187-199.

WWF. 2014a. Problemática de la Mixteca. Oficina de la World Widllife Fund en Oaxaca. Sitio web: <http://www.proyectomixteca.org.mx/la-mixteca-actualidad-y-problematika//> (consultado abril de 2015).

WWF. 2014b. Tasa de transformación de la vegetación en el área de intervención del proyecto Mixteca. Oficina de la World Widllife Fund en Oaxaca. Sitio web: <http://www.proyectomixteca.org.mx/servidor-cartografico/> (consultado abril de 2015).

Zuleta, S. C. A. 2013. Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. Tesis de maestría. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 67p.



## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Bases de datos (factores fisiotécnicos)

**Cuadro 32.** Base de datos de factores fisiotécnicos acorde a los requerimientos del modelo SWAT

CPNM	CROPNAME	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2
RIEG	Agricultura de riego	39	0.5	3	0.15	0.05	0.5	0.95
PASI	Pastizal Inducido	10	0.7	5	0.15	0.05	0.5	0.95
BENC	Bosque de encino	13	0.7	5	0.105	0.05	0.25	0.95
ENPI	Encino-pino	10	0.76	2	0.105	0.05	0.25	0.95
TEMP	Agricultura de temporal	39	0.33	2	0.15	0.05	0.5	0.95
PIEN	Bosque Pino-encino	15	0.76	2	0.105	0.5	0.25	0.99
PINO	Bosque de pino	15	0.75	5	0.105	0.5	0.2599	0.99
AGUA	Agua	0	0	0	0	0	0	0
MATO	Chaparral	13	0.75	1.4	0.05	0.05	0.4	0.95
FRSD	Selva baja caducifolia	15	0.76	5	0.05	0.05	0.4	0.95
FRSE	Bosque mesófilo de montaña	15	0.76	7	0.15	0.7	0.25	0.99
RNGB	Bosque de Tacate	13	0.5	5	0.05	0.7	0.25	0.99

**Cuadro 33.** Continuación del cuadro 24.

DLAI	CHTMX	RDMX	T_OPT	T_BASE	CNYLD	CPYLD	BN1	BN2	BN3	BP1	BP2
0.7	2.5	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048	0.0018
0.99	1	2	25	8	0.0234	0.0033	0.06	0.0231	0.0134	0.0084	0.0032
0.85	3	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004
0.85	3	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004
0.7	2.5	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048	0.0018
0.85	3	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004



DLAI	CHTMX	RDMX	T_OPT	T_BASE	CNYLD	CPYLD	BN1	BN2	BN3	BP1	BP2
0.85	3	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.99	6	3	30	5	0.0015	0.0003	0.02	0.01	0.008	0.0007	0.0004
0.99	6	3.5	30	10	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004
0.99	10	3.5	30	0	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007	0.0004
0.99	6	2	25	3	0.016	0.0022	0.02	0.012	0.005	0.0014	0.001

Cuadro 34. Continuación del cuadro 24.

BP3	WSYF	USLE_C	GSI	VPDFR	FRGMAX	WAVP	CO2HI	BIOEHI	RSDCO_PL
0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660	45	0.05
0.0019	0.01	0.042	0.005	4	0.75	6	660	36	0.05
0.0003	0.75	0.0038	0.005	4	0.75	3	660	16	0.05
0.0003	0.75	0.001	0.005	4	0.75	3	660	16	0.05
0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660	45	0.05
0.0003	0.75	0.0032	0.005	4	0.75	3	660	16	0.05
0.0003	0.75	0.0016	0.005	4	0.75	3	660	16	0.05
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0003	0.75	0.016	0.005	4	0.75	8	660	18	0.05
0.0003	0.01	0.001	0.002	4	0.75	8	660	16	0.05
0.0003	0.6	0.001	0.002	4	0.75	8	660	16	0.05
0.0007	0.6	0.001	0.005	4	0.75	10	660	16	0.05



Cuadro 35. Continuación del cuadro 24.

OV_N	CN2A	CN2B	CN2C	CN2D	FERTFIELD	ALAI_MIN	BIO_LEAF	MAT_YRS	BMX_TREES	EXT_COEF	BM_DIEOFF
0.14	67	78	85	89	1	0	0	0	0	0.65	0.1
0.15	39	61	74	80	0	0	0	0	0	0.65	0.1
0.14	30	55	70	77	0	0.75	0.3	50	1000	0.65	0.1
0.14	35	60	73	79	0	0.75	0.3	50	1000	0.65	0.1
0.14	67	78	85	89	1	0	0	0	0	0.65	0.1
0.14	30	55	70	77	0	0.75	0.3	50	1000	0.65	0.1
0.14	36	60	73	79	0	0.75	0.3	50	1000	0.65	0.1
0.01	92	92	92	92	0	0	0	0	0	0	0.1
0.14	35	56	70	77	0	0.75	0.3	30	1000	0.61	0.1
0.1	36	60	73	79	0	0.75	0.3	10	1000	0.65	0.1
0.1	25	55	70	77	0	0.75	0.3	40	1500	0.65	0.1
0.15	39	61	74	80	0	0.5	0.3	20	1000	0.33	0.1

## Anexo 2. Muestreo y análisis de suelos

En campo, se tomaron 22 muestras de suelo, tomando como base unidades hidrológicas (combinación de suelo y vegetación). En la Figura 56 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo.

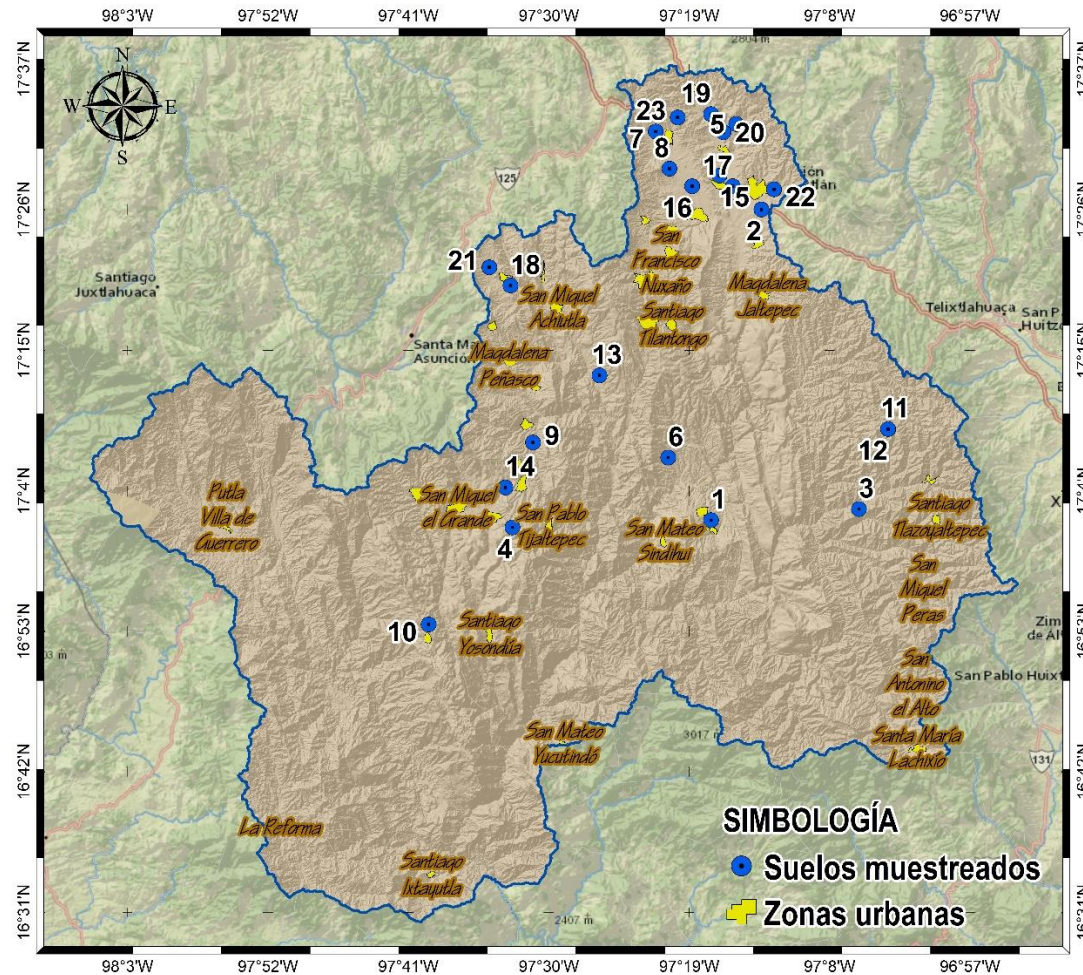


Figura 56. Ubicación de los puntos de muestreo.





**Cuadro 36.** Resultados de laboratorio de las muestras de suelo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*	11*	12*	13*	14*	15*	16*	17	18	19	20
1	0 - 15	-97.288	17.029	7.52	0.32	4.47	14.00	1.27	1.74	3.05	2.26	4.34	8.56	51.05	29.00	19.95	51.05	29.00	Migajon Arcillo Limoso
2	0 - 20	-97.222	17.434	7.71	0.29	0.89	24.50	1.58	0.00	0.95	1.61	5.45	7.93	48.82	35.24	15.94	48.82	35.24	Migajon Arcillo Limoso
2	20 - 30	-97.222	17.434	7.82	0.23	0.64	24.50	1.55	0.31	0.45	0.45	1.35	4.20	63.88	29.36	6.76	63.88	29.36	Migajon Arcillo Limoso
2	30 - 50	-97.222	17.434	7.85	0.19	0.64	21.50	2.18	1.29	1.99	2.94	5.63	7.63	56.44	24.08	19.48	56.44	24.08	Migajon Limoso
3	0 - 20	-97.095	17.043	5.42	0.13	0.64	8.50	1.82	2.43	10.02	16.61	20.81	9.77	32.61	7.76	59.63	32.61	7.76	Migajon Arenoso
4	0 - 30	-97.547	17.019	6.50	0.42	6.25	19.50	1.55	5.03	8.11	7.50	11.72	13.48	22.19	31.96	45.85	22.19	31.96	Migajon Arcillo Arenoso
5	0 - 30	-97.255	17.545	7.61	0.28	1.43	12.00	1.31	0.26	0.36	1.04	4.48	7.47	52.70	33.68	13.62	52.70	33.68	Migajon Arcillo Limoso
5	30 - 60	-97.255	17.545	7.73	0.27	1.17	16.50	1.34	0.17	0.37	1.21	3.84	7.97	57.37	29.08	13.55	57.37	29.08	Migajon Arcillo Limoso
6	0 - 30	-97.344	17.110	7.63	0.33	3.19	23.50	1.60	4.90	6.52	3.44	3.62	11.01	22.82	47.68	29.50	22.82	47.68	Arcilla
6	30 - 60	-97.344	17.110	7.70	0.39	1.15	35.00	1.75	2.69	2.38	1.98	2.65	6.23	29.71	54.36	15.93	29.71	54.36	Arcilla
7	0 - 15	-97.360	17.536	7.08	0.43	6.06	34.50	1.40	0.17	20.81	2.95	6.01	5.82	16.04	48.20	35.76	16.04	48.20	Arcilla
8	0 - 20	-97.342	17.487	7.85	0.16	0.64	27.50	1.50	0.14	0.53	0.81	3.53	9.96	40.35	44.68	14.97	40.35	44.68	Arcilla
9	0 - 30	-97.520	17.130	7.84	0.47	0.89	16.00	1.34	0.36	0.50	0.40	2.48	12.99	69.19	14.08	16.73	69.19	14.08	Migajon Limoso
9	30 - 60	-97.520	17.130	8.07	0.41	0.51	18.50	1.27	0.00	0.00	0.15	3.65	18.98	72.42	4.80	22.78	72.42	4.80	Migajon Limoso
10	0 - 20	-97.657	16.893	6.74	0.20	2.42	6.50	1.40	2.32	0.12	2.92	4.48	7.48	46.80	35.88	17.32	46.80	35.88	Migajon Arcillo Limoso
10	20 - 40	-97.657	16.893	4.84	0.73	0.89	10.50	1.79	1.90	2.41	2.10	3.25	7.45	42.57	40.32	17.11	42.57	40.32	Migajon Arcillo Limoso
10	40 - 60	-97.657	16.893	5.14	0.08	0.38	9.50	1.60	2.14	3.10	2.14	2.88	4.76	36.10	48.88	15.02	36.10	48.88	Arcilla
11	0 - 30	-97.057	17.147	5.68	0.06	2.60	10.50	1.32	2.91	15.69	19.34	19.11	11.77	22.58	8.60	68.82	22.58	8.60	Migajon Arenoso
11	30 - 60	-97.057	17.147	5.61	0.06	2.47	8.50	1.62	0.99	12.03	16.33	17.54	10.35	28.71	14.04	57.25	28.71	14.04	Migajon Arenoso
11	60 - 90	-97.057	17.147	6.05	1.70	2.21	9.00	1.43	4.54	18.46	15.11	13.93	8.15	25.83	13.96	60.21	25.83	13.96	Migajon Arenoso
12	0 - 30	-97.057	17.147	5.54	0.15	1.79	7.50	1.60	10.21	11.55	11.06	13.89	8.23	28.26	16.80	54.94	28.26	16.80	Migajon Arenoso
12	30 - 60	-97.057	17.147	5.95	0.08	0.89	15.50	1.60	1.75	4.54	5.50	5.46	3.29	27.25	52.20	20.55	27.25	52.20	Arcilla
12	60 - 90	-97.057	17.147	6.11	0.08	0.51	13.50	1.63	3.98	5.83	5.20	5.96	3.62	32.68	42.72	24.59	32.68	42.72	Arcilla
13	0 - 15	-97.434	17.217	7.20	0.39	5.62	34.00	1.44	3.36	8.97	9.28	8.75	5.34	20.99	43.32	35.69	20.99	43.32	Arcilla



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*	11*	12*	13*	14*	15*	16*	17	18	19	20
14	0 - 15	-97.557	17.071	7.70	0.46	6.70	29.00	1.54	1.56	3.74	3.13	3.61	15.73	31.51	40.72	27.77	31.51	40.72	Arcilla
15	0 - 30	-97.277	17.478	7.66	0.41	0.53	17.30	SD	0.00	0.94	5.38	19.00	17.10	34.00	24.00	42.00	34.00	24.00	Franco
15	30 - 60	-97.277	17.478	7.84	0.40	0.26	17.70	SD	0.00	1.27	4.88	21.50	13.90	34.00	25.00	41.00	34.00	25.00	Franco
15	60 - 90	-97.277	17.478	7.84	0.45	0.26	15.10	SD	0.00	1.66	5.32	24.80	18.10	36.00	14.00	50.00	36.00	14.00	Franco
16	0 - 30	-97.313	17.464	7.60	0.73	1.85	28.30	SD	0.28	0.62	1.46	10.50	6.59	43.00	38.00	19.00	43.00	38.00	Migajon Arcillo Limoso
16	30 - 60	-97.313	17.464	7.63	0.65	1.06	24.90	SD	0.37	0.31	1.32	5.54	10.60	43.00	39.00	18.00	43.00	39.00	Migajon Arcillo Limoso
16	60 - 90	-97.313	17.464	7.73	0.94	0.53	27.50	SD	0.00	0.00	0.38	1.40	6.63	46.00	45.00	8.00	46.00	45.00	Arcilla Limosa
17	0 - 30	-97.260	17.464	7.70	0.35	0.53	21.30	SD	0.18	0.77	2.25	5.75	8.31	48.00	34.00	17.00	48.00	34.00	Migajon Arcillo Limoso
17	30 - 60	-97.260	17.464	7.72	0.25	0.53	22.70	SD	0.00	0.64	1.91	4.74	10.50	45.00	37.00	18.00	45.00	37.00	Migajon Arcillo Limoso
18	0 - 15	-97.550	17.335	7.12	0.51	3.97	20.50	SD	2.13	3.23	10.40	21.80	15.50	30.00	17.00	53.00	30.00	17.00	Migajon Arenoso
19	0 - 30	-97.288	17.558	7.70	0.28	1.32	22.70	SD	0.00	1.18	3.12	6.45	7.27	50.00	32.00	18.00	50.00	32.00	Migajon Arcillo Limoso
19	30 - 60	-97.288	17.558	7.75	0.28	0.79	24.30	SD	0.00	0.43	1.45	5.67	12.00	53.00	28.00	20.00	53.00	28.00	Migajon Arcillo Limoso
20	0 - 30	-97.272	17.535	7.72	0.28	0.53	21.70	SD	0.22	0.00	4.40	18.20	13.50	42.00	22.00	36.00	42.00	22.00	Franco
20	30 - 60	-97.272	17.535	7.76	0.30	0.26	20.30	SD	0.31	1.51	6.84	21.60	13.20	34.00	22.00	43.00	34.00	22.00	Franco
21	0 - 30	-97.577	17.358	7.55	0.48	2.12	26.70	SD	0.00	0.29	0.65	2.14	12.70	47.00	37.00	16.00	47.00	37.00	Migajon Arcillo Limoso
21	30 - 60	-97.577	17.358	7.77	0.35	0.79	28.70	SD	0.00	0.14	0.60	1.71	8.24	48.00	41.00	11.00	48.00	41.00	Arcilla Limosa
21	60 - 90	-97.577	17.358	7.75	0.30	1.06	25.10	SD	0.00	0.30	0.32	1.67	8.38	52.00	37.00	11.00	52.00	37.00	Migajon Arcillo Limoso
22	0 - 15	-97.206	17.460	6.30	0.32	1.32	7.50	SD	2.45	5.08	12.10	23.10	15.50	33.00	9.00	58.00	33.00	9.00	Migajon Arenoso
22	15 - 30	-97.206	17.460	7.65	0.52	0.79	26.50	SD	0.00	0.35	0.42	1.78	5.09	58.00	35.00	8.00	58.00	35.00	Migajon Arcillo Limoso
22	30 - 60	-97.206	17.460	7.85	0.30	1.32	29.30	SD	0.14	0.42	1.20	5.13	8.98	50.00	34.00	16.00	50.00	34.00	Migajon Arcillo Limoso
22	60 - 90	-97.206	17.460	7.84	0.42	0.79	28.90	SD	0.00	0.21	0.43	2.06	4.47	67.00	26.00	7.00	67.00	26.00	Migajon Limoso
23	0 - 30	-97.332	17.554	7.59	0.35	1.85	31.90	SD	0.31	0.75	1.74	5.53	7.56	52.00	32.00	16.00	52.00	32.00	Migajon Arcillo Limoso

- 1 Clave de la muestra
- 2 Profundidad
- 3 Longitud



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*	11*	12*	13*	14*	15*	16*	17	18	19	20
---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	----	----

- 4 Latitud
  - 5 pH en agua, relación 1:2, mediante pH-metro
  - 6 Conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$ , mediante conductivímetro
  - 7 Materia orgánica en %, mediante W. Black
  - 8 Capacidad de intercambio catiónico en  $\text{meq}/100 \text{ g}$ , mediante A. Amonio
  - 9 Densidad aparente  $\text{g cm}^{-3}$ , mediante T. parafinado
  - 10 Arenas con tamaño de partícula  $>1$
  - 11 Arenas con tamaño de partícula 1.00 - 0.50 mm
  - 12 Arenas con tamaño de partícula 0.50 - 0.25 mm
  - 13 Arenas con tamaño de partícula 0.25 - 0.10 mm
  - 14 Arenas con tamaño de partícula 0.10 - 0.05 mm
  - 15 Limos con tamaño de partícula 0.05 - 0.002 mm
  - 16 Arcillas con tamaño de partícula  $< 0.002 \text{ mm}$
  - 17 Porcentaje total de la distribución granulométrica de arenas (1.00 - 0.05)
  - 18 Porcentaje total de la distribución granulométrica de limos (0.05 - 0.02)
  - 19 Porcentaje total de la distribución granulométrica de arcillas ( $< 0.002$ )
  - 20 Clase textural
- \* Distribución granulométrica del suelo (Método de la pipeta)



### Anexo 3. Bases de datos de suelos.

**Cuadro 37.** Base de datos de suelos acorde a las especificaciones del modelo SWAT

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1
EL	1	B	350	0.5	0.5	Franco	350	1.08	0.114
HcSf	3	B	1000	0.5	0.5	Franco arcillo arenoso	350	1.3	0.18
ISf	1	B	150	0.5	0.5	Franco	150	1.29	0.067
RcSf	2	B	650	0.5	0.5	Franco arcilloso	350	1.24	0.17106
ReL	1	C	350	0.5	0.5	Franco arenoso	350	2.16	0.075
VcSf	3	C	1000	0.5	0.5	Franco arcillo limoso	350	1.61	0.136
AC	4	C	1100	0.5	0.5	ND	190	1.25	0.11
CM	7	B	1250	0.5	0.5	SIL-UWB	100	1.13	0.16
FLP	2	B	1000	0.5	0.5	SIL-UWB	250	1.6	0.05

**Cuadro 38.** Continuación del cuadro 29.

SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1	SOL_Z2
614	5.65	22.6	32.74	44.66	5	0.13	0.023	0.18	0
15	1.39	37.7	27.2	35.1	0	0.13	0.2	0.5	650
80.8	1.22	20.6	33.06	46.34	0	0.13	0.16	0.34	0
1	1.51	38	40	22	0	0.13	0.2	0.15	650
4.3	0.85	9	33	58	50	0.13	0.25	0.14	0
145	1.78	33.1	49.23	17.67	0	0.13	0.13	0.37	650
2.65	2.5	54	30	16	5	0.01	0.005	2.5	380
43.19	3.8	16	44	40	2	0.01	0.32	3.5	160
33.5	0.1	10	14	76	35	0.01	0.2	1	1000



Cuadro 39. Continuación del cuadro 29.

SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	SOL_ALB2	USLE_K2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	0.13	21	0.8	41.2	24.9	33.9	0	0.13	0.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.24	0.15	1	0.58	34	42	24	0	0.13	0.22
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7	0.11	176	0.76	31.3	48.25	20.45	0	0.13	0.38
1.27	0.11	0.93	1.3	54	24	18	2	0.08	0.07
1.41	0.13	24.4	1.7	16	40	44	2	0.08	0.3
1.61	0.04	37.97	0.1	6	12	82	35	0.08	0.2

Cuadro 40. Continuación del cuadro 29.

SOL_EC2	SOL_Z3	SOL_BD3	SOL_AWC3	SOL_K3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.35	1000	1.28	0.14	100	0.52	45	23.9	31.1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.28	1000	1.41	0.127	40.7	1.1	21.5	47.05	31.45	0
1	790	1.26	0.11	0.77	0.8	58	24	18	1
1	320	1.5	0.14	24.46	1	12	46	42	2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Cuadro 41. Continuación del cuadro 29.

SOL_ALB3	USLE_K3	SOL_EC3	SOL_Z4	SOL_BD4	SOL_AWC4	SOL_K4	SOL_CBN4	CLAY4	SILT4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.13	0.21	0.4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.13	0.29	0.44	0	0	0	0	0	0	0
0.13	0.07	1	1100	1.21	0.12	1.4	0.3	58	34
0.13	0.3	2	470	1.6	0.15	14.99	0.3	12	52
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 42. Continuación del cuadro 29.

SAND4	ROCK4	SOL_ALB4	USLE_K4	SOL_EC4	SOL_Z5	SOL_BD5	SOL_AWC5	SOL_K5	SOL_CBN5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0.13	0.07	1	0	0	0	0	0
36	2	0.13	0.3	2.1	720	1.45	0.16	15.81	1.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Cuadro 43. Continuación del cuadro 29.

CLAY5	SILT5	SAND5	ROCK5	SOL_ALB5	USLE_K5	SOL_EC5	SOL_Z6	SOL_BD6	SOL_AWC6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	54	30	2	0.13	0.3	2.6	910	1.6	0.12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 44. Continuación del cuadro 29.

SOL_K6	SOL_CBN6	CLAY6	SILT6	SAND6	ROCK6	SOL_ALB6	USLE_K6	SOL_EC6	SOL_Z7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.36	0.2	16	40	44	2	0.13	0.2	2.6	1250
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Cuadro 45. Continuación del cuadro 29.

SOL_BD7	SOL_AWC7	SOL_K7	SOL_CBN7	CLAY7	SILT7	SAND7	ROCK7	SOL_ALB7	USLE_K7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.62	0.14	12.54	0.1	14	48	38	2	0.13	0.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 46. Continuación del cuadro 29.

SOL_EC7	SOL_Z8	SOL_BD8	SOL_AWC8	SOL_K8	SOL_CBN8	CLAY8	SILT8	SAND8	ROCK8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0





Cuadro 47. Continuación del cuadro 29.

SOL_ALB8	USLE_K8	SOL_EC8	SOL_Z9	SOL_BD9	SOL_AWC9	SOL_K9	SOL_CBN9	CLAY9	SILT9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 48. Continuación del cuadro 29.

SAND9	ROCK9	SOL_ALB9	USLE_K9	SOL_EC9	SOL_Z10	SOL_BD10	SOL_AWC10	SOL_K10	SOL_CBN10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Cuadro 49. Continuación del cuadro 29.

CLAY10	SILT10	SAND10	ROCK10	SOL_ALB10	USLE_K10	SOL_EC10	SOL_CAL1	SOL_CAL2	SOL_CAL3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 50. Continuación del cuadro 29.

SOL_CAL4	SOL_CAL5	SOL_CAL6	SOL_CAL7	SOL_CAL8	SOL_CAL9	SOL_CAL10	SOL_PH1	SOL_PH2	SOL_PH3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Cuadro 51. Continuación del cuadro 29.

SOL_PH4	SOL_PH5	SOL_PH6	SOL_PH7	SOL_PH8	SOL_PH9	SOL_PH10
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0



#### Anexo 4. Estadísticas de las estaciones climatológicas.

Cuadro 52. Estadísticas de la estación meteorológica 20187

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		11.00	20.00	8.00	19.00	96.00	210.00	215.00	233.00	231.00	114.00	23.00	13.00
<b>Dry day count</b>		300.00	322.00	303.00	293.00	215.00	102.00	94.00	78.00	81.00	197.00	319.00	329.00
<b>Wet days following dry days count</b>		9.00	17.00	6.00	14.00	42.00	59.00	60.00	47.00	55.00	55.00	17.00	11.00
<b>Wet days following wet days count</b>		2.00	3.00	2.00	5.00	54.00	151.00	154.00	186.00	176.00	59.00	6.00	2.00
<b>Days of valid data count</b>		311.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	309.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.30	0.52	0.20	0.84	4.08	9.45	10.52	10.67	11.07	4.39	0.55	0.31
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	34.03	33.46	37.08	37.90	37.18	33.63	33.33	33.42	32.51	33.48	33.45	33.86
	<b>sum</b>	10,582.60	11,441.90	11,532.60	11,826.00	11,563.10	10,492.90	10,365.20	10,394.20	10,143.70	10,412.90	11,440.10	11,581.10
	<b>std.dev.</b>	1.67	4.56	2.24	2.89	2.44	3.17	1.72	2.05	2.82	1.70	2.53	1.59
	<b>min</b>	23.00	18.00	22.00	24.00	23.00	21.00	21.00	21.00	20.00	23.00	20.00	23.00
	<b>max</b>	37.50	39.00	41.60	43.80	47.00	48.00	37.10	38.00	37.00	36.90	38.00	39.10
	<b>count</b>	311.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	17.82	16.91	19.67	21.07	22.77	22.39	22.02	22.01	21.80	21.83	19.41	18.23
	<b>sum</b>	5,541.10	5,784.60	6,116.30	6,573.20	7,080.30	6,985.40	6,848.40	6,843.80	6,801.00	6,787.70	6,638.20	6,233.90
	<b>std.dev.</b>	2.59	5.43	2.30	3.61	1.92	2.57	1.22	1.30	2.21	1.59	3.76	2.72
	<b>min</b>	2.00	-2.00	5.00	3.00	8.00	8.00	12.00	9.00	11.00	12.00	-4.00	7.00
	<b>max</b>	24.90	25.00	26.00	25.60	27.50	26.00	25.60	24.70	25.00	25.80	27.60	27.70
	<b>count</b>	311.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00



Cuadro 53. Estadísticas de la estación meteorológica 20186

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		23.00	32.00	13.00	44.00	101.00	194.00	183.00	177.00	181.00	116.00	42.00	20.00
<b>Dry day count</b>		319.00	278.00	267.00	208.00	210.00	118.00	128.00	134.00	131.00	226.00	270.00	296.00
<b>Wet days following dry days count</b>		17.00	26.00	9.00	25.00	37.00	49.00	56.00	48.00	49.00	48.00	30.00	16.00
<b>Wet days following wet days count</b>		6.00	6.00	4.00	19.00	64.00	145.00	127.00	129.00	132.00	68.00	12.00	4.00
<b>Days of valid data count</b>		342.00	310.00	280.00	252.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	342.00	312.00	316.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.44	0.77	0.10	0.96	2.99	6.53	6.19	6.48	5.70	2.03	0.67	0.19
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	21.23	21.82	23.33	23.17	23.77	23.19	22.35	22.78	22.25	22.46	22.46	21.61
	<b>sum</b>	7,259.50	6,741.50	6,531.20	5,839.00	7,391.80	7,235.50	6,951.00	7,084.50	6,941.40	7,682.80	7,006.20	6,829.50
	<b>std.dev.</b>	3.54	3.11	3.12	1.82	3.18	4.76	3.86	4.52	3.89	3.66	3.88	3.51
	<b>min</b>	13.50	9.00	13.00	18.00	16.00	15.00	15.00	15.00	15.50	14.00	12.00	14.00
	<b>max</b>	30.00	31.50	33.00	29.00	34.00	36.00	32.50	39.00	33.50	31.50	30.50	30.50
	<b>count</b>	342.00	309.00	280.00	252.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	342.00	312.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	8.55	7.57	9.40	10.09	11.89	12.16	12.29	12.02	11.89	11.41	10.11	9.30
	<b>sum</b>	2,922.50	2,340.00	2,633.00	2,542.80	3,696.50	3,794.00	3,823.50	3,739.00	3,710.00	3,901.00	3,155.50	2,930.00
	<b>std.dev.</b>	5.01	4.60	3.99	3.07	3.08	2.18	2.82	2.54	2.69	3.17	4.52	4.72
	<b>min</b>	1.00	-5.00	3.00	3.00	1.50	7.00	7.00	7.50	3.00	5.00	-4.00	1.00
	<b>max</b>	20.00	19.00	18.00	19.50	21.00	18.50	19.50	19.50	18.50	21.00	20.00	19.00
	<b>count</b>	342.00	309.00	280.00	252.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	342.00	312.00	315.00



Cuadro 54. Estadísticas de la estación meteorológica 20178

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
<b>Wet day count</b>		19.00	40.00	14.00	50.00	115.00	192.00	184.00	178.00	183.00	83.00	34.00	18.00	
<b>Dry day count</b>		323.00	302.00	297.00	262.00	196.00	120.00	127.00	133.00	129.00	228.00	308.00	324.00	
<b>Wet days following dry days count</b>		14.00	24.00	10.00	36.00	39.00	45.00	64.00	48.00	63.00	40.00	27.00	16.00	
<b>Wet days following wet days count</b>		5.00	16.00	4.00	14.00	76.00	147.00	120.00	130.00	120.00	43.00	7.00	2.00	
<b>Days of valid data count</b>		342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00	
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.45	0.81	0.33	0.81	3.08	6.00	5.26	4.70	5.22	1.57	0.43	0.19	
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	21.64	22.33	23.55	24.18	23.74	21.72	20.93	21.14	21.23	21.78	21.32	21.00	
	<b>sum</b>	7,400.00	7,638.50	7,325.00	7,544.00	7,382.50	6,777.00	6,510.30	6,574.00	6,623.50	6,775.00	7,290.00	7,181.50	
	<b>std.dev.</b>	3.44	3.46	3.68	3.25	3.55	2.55	2.29	2.28	2.46	2.94	2.81	3.11	
	<b>min</b>	12.00	11.00	10.00	11.00	15.00	16.00	14.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.00	
	<b>max</b>	32.00	34.00	34.00	33.00	34.00	28.00	29.00	29.00	29.00	29.00	30.00	35.00	31.00
	<b>count</b>	342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	1.24	3.09	4.01	6.32	8.78	10.49	10.16	9.94	10.17	8.14	3.85	1.95	
	<b>sum</b>	423.30	1,056.50	1,248.00	1,971.50	2,731.00	3,271.50	3,159.50	3,092.00	3,172.50	2,530.00	1,317.40	668.00	
	<b>std.dev.</b>	3.36	4.17	3.35	2.61	2.62	2.12	1.91	2.16	2.18	3.26	3.90	3.71	
	<b>min</b>	-12.00	-7.00	-7.00	-1.00	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	-2.00	-8.00	-10.00
	<b>max</b>	9.80	16.50	12.00	13.00	14.00	15.00	14.00	14.00	13.00	14.00	14.00	12.00	11.00
	<b>count</b>	342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00



Cuadro 55. Estadísticas de la estación meteorológica 20130

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		44.00	36.00	19.00	44.00	110.00	196.00	189.00	196.00	198.00	134.00	58.00	24.00
<b>Dry day count</b>		267.00	249.00	261.00	238.00	170.00	86.00	122.00	115.00	114.00	177.00	284.00	318.00
<b>Wet days following dry days count</b>		23.00	23.00	12.00	28.00	36.00	34.00	51.00	42.00	44.00	42.00	36.00	19.00
<b>Wet days following wet days count</b>		21.00	13.00	7.00	16.00	74.00	162.00	138.00	154.00	154.00	92.00	22.00	5.00
<b>Days of valid data count</b>		311.00	285.00	280.00	282.00	280.00	282.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	1.83	1.59	1.06	2.61	5.88	11.08	8.69	10.14	10.31	4.76	1.66	0.70
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	24.78	24.86	26.22	26.83	26.10	24.23	24.37	24.54	24.04	24.96	25.34	25.67
	<b>sum</b>	7,708.00	7,059.50	7,342.80	7,565.50	7,307.00	6,832.70	7,578.80	7,632.30	7,501.10	7,761.10	8,665.60	8,779.50
	<b>std.dev.</b>	1.82	1.91	1.77	1.62	1.76	1.93	1.74	1.78	1.99	1.74	1.63	1.63
	<b>min</b>	19.00	18.00	16.10	23.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
	<b>max</b>	29.00	29.00	30.00	30.00	30.50	29.00	28.00	29.00	30.00	28.00	29.00	29.00
	<b>count</b>	311.00	284.00	280.00	282.00	280.00	282.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	14.56	13.29	15.39	15.70	16.64	16.67	16.69	16.70	16.44	16.41	15.46	15.37
	<b>sum</b>	4,527.50	3,773.50	4,308.00	4,427.50	4,659.00	4,702.00	5,191.40	5,194.00	5,128.50	5,102.00	5,288.00	5,255.00
	<b>std.dev.</b>	1.36	4.31	1.50	2.43	1.41	1.52	1.11	1.04	1.21	0.94	2.39	1.43
	<b>min</b>	2.00	-2.00	5.00	3.00	8.00	8.00	12.00	9.00	11.00	12.00	-4.00	7.00
	<b>max</b>	18.50	17.00	18.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	18.00	20.00	19.00	18.00
	<b>count</b>	311.00	284.00	280.00	282.00	280.00	282.00	311.00	311.00	312.00	311.00	342.00	342.00



Cuadro 56. Estadísticas de la estación meteorológica 20105

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		18.00	35.00	17.00	50.00	104.00	180.00	168.00	147.00	165.00	92.00	35.00	16.00
<b>Dry day count</b>		324.00	278.00	294.00	262.00	207.00	132.00	143.00	164.00	147.00	250.00	307.00	326.00
<b>Wet days following dry days count</b>		13.00	22.00	12.00	29.00	50.00	52.00	63.00	52.00	52.00	50.00	25.00	12.00
<b>Wet days following wet days count</b>		5.00	13.00	5.00	21.00	54.00	128.00	105.00	95.00	113.00	42.00	10.00	4.00
<b>Days of valid data count</b>		342.00	313.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	342.00	342.00	342.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.74	1.08	0.43	1.24	3.34	6.82	5.58	5.12	5.53	2.44	0.74	0.30
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	7.49	9.16	8.98	10.67	11.06	11.46	10.66	10.61	11.04	9.98	9.23	8.20
	<b>sum</b>	2,561.20	2,865.60	2,793.00	3,329.00	3,439.00	3,574.80	3,315.60	3,300.00	3,443.50	3,414.50	3,155.70	2,805.00
	<b>std.dev.</b>	1.84	4.53	1.91	3.45	1.61	2.81	1.18	1.25	2.52	1.67	3.02	1.79
	<b>min</b>	2.00	3.00	3.50	4.50	6.00	6.00	7.00	7.00	5.00	5.00	2.00	3.00
	<b>max</b>	23.00	25.00	23.00	27.50	23.00	26.50	21.00	21.00	24.00	25.00	24.50	23.00
	<b>count</b>	342.00	313.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	342.00	342.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	7.43	7.17	8.92	9.90	11.01	11.00	10.63	10.57	10.67	9.95	8.62	8.15
	<b>sum</b>	2,540.20	2,245.10	2,775.00	3,089.50	3,424.00	3,431.80	3,306.60	3,288.00	3,327.50	3,401.50	2,948.70	2,789.00
	<b>std.dev.</b>	1.67	2.48	1.75	1.83	1.47	1.37	1.02	1.10	1.32	1.47	1.85	1.60
	<b>min</b>	2.00	-2.00	3.50	3.00	6.00	6.00	7.00	7.00	5.00	5.00	-4.00	3.00
	<b>max</b>	11.50	12.00	14.00	15.00	15.00	15.00	14.00	13.00	14.00	13.00	12.00	12.00
	<b>count</b>	342.00	313.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	342.00	342.00	342.00





Cuadro 57. Estadísticas de la estación meteorológica 20102

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
<b>Wet day count</b>		6.00	17.00	24.00	39.00	102.00	143.00	143.00	106.00	163.00	59.00	21.00	4.00	
<b>Dry day count</b>		310.00	325.00	287.00	257.00	240.00	139.00	199.00	236.00	149.00	252.00	291.00	307.00	
<b>Wet days following dry days count</b>		4.00	12.00	13.00	24.00	45.00	47.00	51.00	39.00	47.00	17.00	14.00	4.00	
<b>Wet days following wet days count</b>		2.00	5.00	10.00	15.00	55.00	96.00	92.00	67.00	115.00	42.00	7.00	0.00	
<b>Days of valid data count</b>		316.00	342.00	311.00	296.00	342.00	282.00	342.00	342.00	312.00	311.00	312.00	311.00	
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.18	0.26	0.46	0.90	2.72	5.41	5.42	5.41	7.92	1.60	0.47	0.02	
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	24.88	25.55	28.03	28.86	28.30	26.54	25.73	25.64	25.40	25.98	26.01	25.42	
	<b>sum</b>	7,838.50	8,737.50	8,718.20	8,514.50	9,680.00	7,483.60	8,800.00	8,770.00	7,923.90	8,078.50	8,116.50	7,906.50	
	<b>std.dev.</b>	2.76	2.83	2.93	3.44	2.96	2.50	3.48	2.85	3.15	2.37	2.07	2.31	
	<b>min</b>	12.00	17.00	15.00	19.00	21.00	20.00	20.00	20.00	18.00	18.00	20.00	20.00	19.00
	<b>max</b>	30.00	31.00	35.00	36.00	35.00	33.00	39.00	35.00	36.50	32.00	32.00	31.00	31.00
	<b>count</b>	315.00	342.00	311.00	295.00	342.00	282.00	342.00	342.00	342.00	312.00	311.00	312.00	311.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	9.83	9.42	10.82	11.73	12.76	13.29	12.93	12.59	12.86	13.42	11.45	10.30	
	<b>sum</b>	3,097.00	3,220.50	3,365.00	3,460.00	4,364.00	3,746.50	4,422.50	4,304.50	4,012.40	4,172.50	3,571.00	3,204.50	
	<b>std.dev.</b>	2.63	3.68	2.33	2.17	2.17	1.64	1.53	1.41	1.77	2.21	3.54	2.75	
	<b>min</b>	2.00	-2.00	5.00	3.00	5.00	8.00	9.00	7.00	1.40	8.00	-4.00	3.00	
	<b>max</b>	17.00	22.00	19.00	20.00	18.00	18.00	20.00	20.00	17.00	18.00	22.50	18.00	
	<b>count</b>	315.00	342.00	311.00	295.00	342.00	282.00	342.00	342.00	312.00	311.00	312.00	311.00	



Cuadro 58. Estadísticas de la estación meteorológica 20094

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		21.00	29.00	11.00	27.00	95.00	235.00	236.00	243.00	240.00	150.00	45.00	10.00
<b>Dry day count</b>		321.00	313.00	300.00	285.00	216.00	77.00	75.00	68.00	72.00	161.00	267.00	301.00
<b>Wet days following dry days count</b>		16.00	20.00	7.00	14.00	36.00	39.00	52.00	41.00	52.00	56.00	28.00	8.00
<b>Wet days following wet days count</b>		5.00	9.00	4.00	13.00	59.00	196.00	184.00	202.00	188.00	94.00	17.00	2.00
<b>Days of valid data count</b>		342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.68	0.91	0.34	0.96	4.83	14.03	13.75	14.57	14.87	7.59	1.15	0.29
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	31.07	31.14	33.82	33.81	32.64	29.52	29.21	29.52	28.97	30.17	30.90	31.12
	<b>sum</b>	10,625.30	10,649.90	10,517.90	10,548.50	10,151.10	9,211.10	9,084.30	9,179.60	9,039.00	9,383.50	9,639.30	9,678.30
	<b>std.dev.</b>	1.94	3.60	2.10	2.24	2.03	2.40	1.78	1.91	2.26	1.92	2.41	1.92
	<b>min</b>	23.00	18.00	19.00	24.00	23.00	21.00	21.00	21.00	20.00	20.00	20.00	21.00
	<b>max</b>	35.00	36.00	39.00	39.00	37.00	35.00	34.00	34.00	33.00	33.50	36.00	36.50
	<b>count</b>	342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	312.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	14.14	13.37	14.97	16.07	18.36	19.07	18.55	18.63	18.75	18.39	15.72	14.37
	<b>sum</b>	4,835.30	4,573.50	4,654.50	5,014.70	5,710.80	5,949.50	5,769.00	5,794.00	5,850.50	5,719.50	4,905.00	4,468.50
	<b>std.dev.</b>	2.48	4.29	2.21	3.02	1.99	1.86	1.01	1.06	1.57	1.58	3.17	2.52
	<b>min</b>	2.00	-2.00	5.00	3.00	8.00	8.00	12.00	9.00	11.00	11.50	-4.00	7.00
	<b>max</b>	20.00	20.00	20.00	20.50	22.50	22.00	21.00	20.50	21.00	21.50	20.50	19.50
	<b>count</b>	342.00	342.00	311.00	312.00	311.00	312.00	311.00	311.00	311.00	312.00	311.00	312.00



Cuadro 59. Estadísticas de la estación meteorológica 20076

Variable		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<b>Wet day count</b>		4.00	13.00	20.00	19.00	47.00	72.00	37.00	51.00	48.00	11.00	6.00	5.00
<b>Dry day count</b>		273.00	271.00	288.00	262.00	232.00	180.00	241.00	227.00	230.00	266.00	273.00	273.00
<b>Wet days following dry days count</b>		3.00	10.00	11.00	13.00	23.00	31.00	26.00	17.00	24.00	7.00	4.00	3.00
<b>Wet days following wet days count</b>		1.00	3.00	9.00	6.00	23.00	41.00	11.00	33.00	24.00	4.00	2.00	2.00
<b>Days of valid data count</b>		277.00	284.00	308.00	281.00	279.00	252.00	278.00	278.00	278.00	277.00	279.00	278.00
<b>Precip.</b>	<b>mean</b>	0.16	0.38	0.68	0.75	2.89	3.41	1.68	2.05	2.64	0.33	0.14	0.15
<b>Max. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	25.11	24.91	26.01	26.68	26.44	25.61	25.40	25.45	25.09	24.86	24.36	24.56
	<b>sum</b>	8,360.80	8,320.30	8,660.50	8,910.00	8,753.20	8,580.40	8,457.40	7,659.90	8,381.70	8,254.50	8,134.60	8,153.10
	<b>std.dev.</b>	2.36	1.96	1.46	1.34	1.19	1.20	1.56	1.23	1.27	1.57	1.76	1.62
	<b>min</b>	13.00	18.00	20.00	21.50	19.00	20.00	19.00	20.00	20.00	18.50	19.00	17.50
	<b>max</b>	29.00	30.00	30.50	31.00	30.50	28.50	27.80	27.80	27.80	27.50	27.80	28.00
	<b>count</b>	333.00	334.00	333.00	334.00	331.00	335.00	333.00	301.00	334.00	332.00	334.00	332.00
<b>Min. temperature for all days</b>	<b>mean</b>	5.22	5.02	6.21	6.94	6.78	7.36	6.99	6.80	6.24	6.03	5.12	4.75
	<b>sum</b>	1,754.50	1,682.20	2,081.10	2,326.50	2,264.60	2,481.40	2,340.50	2,054.00	2,089.40	2,008.60	1,709.40	1,580.70
	<b>std.dev.</b>	2.25	2.04	1.27	1.14	1.49	2.71	2.13	2.06	2.29	2.01	1.64	1.69
	<b>min</b>	-7.00	-2.00	1.00	3.00	1.00	4.00	4.00	1.10	0.60	2.00	-4.00	-2.00
	<b>max</b>	8.50	10.00	11.00	11.00	12.50	15.50	14.00	13.50	14.50	13.00	11.00	10.00
	<b>count</b>	336.00	335.00	335.00	335.00	334.00	337.00	335.00	302.00	335.00	333.00	334.00	333.00



## Anexo 5. Base de datos (clima)

**Cuadro 60.** Base de datos de los generadores climáticos acorde a las especificaciones del modelo SWAT.

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9
20010	16.583	-98.067	430	11	34.284	35.295	35.369	36.475	35.266	32.184	32.167	31.629	31.897
20026	17.033	-97.583	2250	11	21.660	23.515	25.311	25.460	25.443	22.783	22.123	22.137	21.915
20038	16.567	-97.667	510	11	32.925	33.856	35.069	36.271	35.194	31.918	31.240	31.210	30.259
20044	17.067	-96.883	1650	11	25.459	26.595	29.418	30.665	30.141	27.172	26.054	26.506	25.833
20077	17.567	-97.667	715	11	33.670	34.841	35.234	36.458	35.138	32.685	32.050	32.167	31.510
20094	17.11667	-97.87305	1316	38	31.180	31.890	33.510	33.970	32.860	30.000	29.590	29.550	29.300
20102	17.2	-97.51778	2018	28	23.990	24.330	25.770	26.490	27.070	25.770	25.090	25.290	25.110
20103	17.57211	-97.52275	2296	55	22.192	23.742	24.951	26.337	25.772	23.919	22.561	22.857	22.218
20105	17.065	-97.67917	2455	34	21.020	21.450	22.640	23.110	22.880	21.500	20.890	20.880	20.730
20108	17.74275	-97.81784	1510	33	26.962	28.199	30.701	32.215	31.595	29.292	28.790	28.870	27.064
20110	17.633	-98.083	1409	11	30.122	31.454	33.880	35.102	34.259	32.056	30.702	31.292	30.289
20115	17.3	-98.067	1820	11	22.391	22.344	24.015	25.080	24.459	23.144	22.349	23.068	22.745
20121	17.517	-97.1	2300	11	22.389	23.717	25.815	29.253	27.900	25.119	23.251	23.620	23.818
20125	17.55552	-97.81423	1911	32	28.835	30.275	32.508	33.755	33.624	30.400	29.444	29.774	29.311
20126	16.533	-97.483	970	11	29.494	29.916	30.825	31.730	30.316	27.730	27.993	28.533	27.897
20130	17.01667	-97.79972	1876	40	25.130	25.370	26.460	27.210	26.190	24.310	24.680	24.550	24.090
20137	17.72211	-97.53684	2079	34	21.749	23.410	25.588	26.544	25.977	23.690	22.603	22.518	22.350
20141	17.49756	-98.14368	1684	59	28.164	29.426	32.100	33.826	33.274	30.837	28.865	28.420	28.149
20142	17.503	-98.14	1684	19	27.380	28.610	30.817	31.340	31.237	28.851	27.894	27.888	27.286
20143	17.667	-97.417	2120	11	20.941	22.402	25.795	26.786	26.431	22.886	21.518	21.906	21.671
20144	17.733	-97.35	1875	11	20.909	22.389	25.793	26.768	26.425	22.868	21.490	21.790	21.665
20146	17.65	-98.183	1782	11	23.170	24.453	27.333	28.892	27.796	24.459	23.177	23.356	22.911
20153	16.6	-97.217	1300	11	26.051	28.147	29.913	30.144	29.361	27.279	27.445	27.293	26.483
20159	17.50131	-97.48254	2183	32	23.844	24.744	25.963	26.813	26.219	23.933	23.161	23.620	23.183
20163	17.33328	-97.8	2023	42	28.146	29.661	31.751	33.222	32.737	29.596	28.438	28.555	28.491
20178	17.03306	-97.58305	2428	40	20.720	21.630	22.870	23.680	23.180	21.010	20.300	20.700	20.460
20259	16.75	-97.783	900	11	32.529	33.694	36.113	37.662	37.234	35.372	34.445	33.788	33.421



Cuadro 61. Continuación del cuadro 53.

TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12	TMPSTDMX1
32.997	34.058	34.756	17.918	18.151	17.924	18.926	19.560	19.536	19.130	18.375	18.733	18.570	19.080	18.531	2.457
21.966	21.767	21.387	1.352	3.683	5.026	5.900	8.860	10.408	10.128	9.733	10.076	7.989	4.560	2.370	2.319
31.846	32.588	32.712	15.331	15.892	17.177	19.250	20.426	20.780	19.991	20.003	20.256	19.922	17.682	16.185	1.592
26.236	26.170	25.469	8.672	9.587	11.826	13.109	14.701	14.739	13.867	13.760	13.994	12.948	10.720	9.840	2.895
32.478	33.585	33.366	16.144	16.884	16.861	18.674	20.278	20.739	20.180	20.143	20.388	19.705	18.754	17.004	1.864
30.200	30.770	30.780	14.060	14.620	15.340	16.570	18.340	19.420	18.800	18.850	19.210	18.570	16.810	14.950	2.360
25.600	25.320	24.710	9.890	10.140	10.990	12.240	12.840	13.460	12.870	12.670	13.310	12.890	11.510	10.340	3.710
22.516	21.794	21.768	4.082	4.805	6.501	8.555	9.668	10.746	10.190	10.096	10.333	8.845	6.136	4.364	3.700
21.470	21.160	20.930	8.030	8.290	9.210	9.960	10.570	10.520	10.410	10.360	10.140	9.690	8.940	8.450	2.030
28.267	28.081	27.158	8.441	9.905	11.297	13.574	14.871	14.813	14.486	14.388	14.285	12.544	10.350	9.028	3.628
30.841	30.703	30.495	10.157	11.402	12.853	14.786	16.401	16.718	15.482	15.174	15.742	14.148	11.617	10.800	2.127
23.376	23.152	22.911	8.749	9.151	9.944	10.759	11.732	11.759	11.253	11.205	11.417	10.710	9.523	9.172	2.490
23.125	22.394	21.623	6.246	6.873	7.770	8.262	8.798	8.313	8.422	8.239	8.132	7.323	7.002	6.508	3.208
29.659	29.603	28.952	11.354	12.894	15.064	16.724	17.815	17.812	16.962	16.953	16.605	16.097	13.421	12.029	2.541
28.560	29.985	29.714	15.235	15.001	15.766	16.789	17.159	17.353	16.775	16.550	16.479	15.761	16.153	15.762	1.888
25.010	25.480	25.410	13.750	13.500	14.410	15.240	15.840	15.990	15.770	15.770	15.720	15.310	14.750	14.310	2.420
22.158	21.901	21.746	5.695	6.217	7.450	8.655	9.992	10.640	10.287	10.372	10.450	8.777	7.379	6.112	2.574
27.863	27.500	27.399	8.559	9.188	11.063	13.444	14.657	14.675	13.689	13.549	13.583	12.066	9.957	8.923	3.821
27.564	27.000	27.046	10.698	11.135	12.635	14.173	15.034	15.193	14.600	14.170	14.720	13.810	12.021	11.185	2.754
21.405	21.006	20.481	5.526	6.309	8.509	9.968	11.273	11.414	11.045	10.962	11.298	9.496	7.315	6.558	3.577
21.376	21.192	20.584	5.529	6.309	8.506	9.982	11.274	11.417	11.056	10.865	11.303	9.512	7.408	6.447	3.654
23.164	23.000	22.723	11.543	11.564	13.449	14.461	14.752	14.456	13.808	13.906	13.868	13.195	11.911	11.902	2.033
27.437	27.165	26.691	10.529	11.619	12.816	13.610	14.479	14.924	14.660	14.532	14.398	13.993	12.230	11.518	3.655
23.108	23.549	23.249	3.834	4.922	6.353	7.455	8.459	9.764	9.366	9.270	9.515	7.979	5.728	4.626	2.341
28.645	28.629	28.187	8.054	9.901	11.555	13.493	14.356	14.803	14.616	14.230	14.232	12.836	10.123	8.850	2.516
21.000	20.770	20.350	1.440	2.540	4.170	6.280	8.610	10.420	9.760	9.760	9.970	7.970	4.510	2.380	2.910
33.296	32.499	32.244	17.521	18.138	19.123	19.835	20.978	21.187	20.667	20.383	20.718	20.478	18.604	17.929	1.885



Cuadro 62. Continuación del cuadro 53.

TMPSTDMX2	TMPSTDMX3	TMPSTDMX4	TMPSTDMX5	TMPSTDMX6	TMPSTDMX7	TMPSTDMX8	TMPSTDMX9	TMPSTDMX10	TMPSTDMX11	TMPSTDMX12
2.754	3.998	3.548	4.185	3.584	3.605	4.151	3.905	3.239	2.163	2.201
3.950	3.804	2.304	3.365	1.894	2.036	1.779	2.105	1.879	2.033	2.177
1.955	1.884	1.395	2.108	2.236	1.800	1.847	1.879	1.550	1.526	1.766
2.829	2.924	2.393	2.624	2.285	2.065	1.964	2.359	2.375	2.422	2.513
2.144	3.921	3.400	4.269	4.033	4.012	3.908	4.126	3.829	1.788	1.957
2.400	2.110	2.100	2.290	2.340	1.750	1.820	1.860	1.930	2.250	2.400
4.050	4.320	4.430	3.910	3.400	3.720	3.260	3.540	3.390	3.590	3.830
3.385	3.665	3.466	3.589	3.340	3.052	3.132	3.083	3.269	3.445	3.554
1.940	2.050	2.130	2.070	2.320	1.790	1.940	2.000	2.230	1.730	1.690
4.033	3.849	2.866	3.464	4.386	4.355	4.197	3.537	4.247	4.155	3.893
1.823	2.014	2.180	2.906	2.734	2.068	2.214	2.077	1.755	1.643	1.532
2.089	2.169	2.453	2.293	2.070	1.995	1.925	2.524	2.301	2.446	2.664
4.298	3.972	4.466	4.583	4.342	3.220	3.897	4.060	4.296	2.706	3.111
2.420	2.226	2.120	2.100	3.013	2.321	2.327	2.181	1.974	2.264	2.165
2.150	2.046	1.546	2.446	2.464	2.276	2.256	2.452	2.513	1.757	1.955
1.850	1.830	1.880	2.110	2.130	1.990	1.980	2.140	1.880	1.780	1.690
3.018	3.114	2.962	2.900	2.394	1.911	2.042	2.287	2.312	2.472	2.499
3.387	3.515	3.705	4.052	3.991	5.407	5.162	5.326	5.201	5.064	5.720
2.276	2.733	3.068	2.553	2.490	2.189	2.245	2.481	2.378	2.269	2.271
3.547	3.186	2.942	2.891	2.744	2.060	2.212	2.191	2.985	3.291	3.539
3.569	3.270	2.987	2.912	2.729	2.007	2.165	2.174	3.020	3.243	3.669
2.458	2.820	2.430	2.942	2.703	1.896	1.739	1.613	1.976	2.005	1.888
3.009	2.324	2.490	2.751	2.122	1.968	2.442	2.547	2.458	2.310	2.682
2.576	2.429	2.752	2.822	2.483	1.999	2.115	2.085	2.236	2.630	2.186
2.522	2.155	2.153	2.267	2.635	1.741	1.754	2.079	2.135	2.618	2.423
3.190	3.380	3.270	3.300	2.890	2.440	2.380	2.590	2.910	2.910	2.910
2.104	2.630	2.700	2.806	2.457	2.149	2.365	1.950	1.835	2.003	1.862



Cuadro 63. Continuación del cuadro 53.

TMPSTDMN1	TMPSTDMN2	TMPSTDMN3	TMPSTDMN4	TMPSTDMN5	TMPSTDMN6	TMPSTDMN7	TMPSTDMN8	TMPSTDMN9	TMPSTDMN10	TMPSTDMN11
1.416	1.484	3.258	3.271	3.006	2.735	2.689	3.405	2.463	3.120	1.372
3.373	5.000	4.837	3.307	3.535	2.625	2.426	2.745	2.619	3.183	3.209
1.905	2.173	1.950	1.675	1.767	0.982	0.848	0.839	0.796	1.283	2.098
2.380	2.502	2.293	1.957	1.603	1.619	1.745	1.640	1.800	1.851	2.333
2.302	2.022	3.677	3.982	3.700	3.412	3.191	3.356	3.201	3.973	2.291
2.880	2.850	2.690	2.510	2.230	1.450	1.280	1.270	1.170	1.820	2.550
2.790	2.780	2.980	2.760	2.810	3.000	2.680	2.740	2.090	2.330	2.920
3.494	3.376	2.992	2.820	2.422	2.005	2.217	2.337	2.298	2.889	3.464
1.610	1.560	2.260	1.860	1.910	1.900	1.810	1.830	1.350	1.340	1.460
3.585	3.544	3.888	4.078	3.834	4.054	3.816	3.832	3.607	4.040	3.843
2.503	2.111	2.186	1.754	1.892	1.692	1.528	1.799	1.444	2.297	2.768
1.968	1.762	1.763	1.857	1.828	1.773	1.704	1.671	1.689	1.765	1.969
1.971	2.114	2.049	2.276	2.213	2.145	2.149	2.037	1.654	2.468	1.860
3.038	2.924	3.012	2.628	2.187	2.673	2.137	1.806	1.786	2.352	2.683
1.585	2.737	2.486	2.549	2.674	1.900	1.783	1.856	1.672	2.536	1.471
1.980	2.220	1.730	1.560	1.490	1.390	1.390	1.350	1.330	1.670	1.880
2.687	2.846	2.250	1.895	1.947	1.776	2.183	1.973	2.197	2.405	2.539
2.553	2.587	3.014	2.732	2.654	2.765	3.370	3.141	3.307	3.209	3.015
2.973	2.913	2.637	2.009	1.498	1.427	1.601	1.491	1.578	2.062	3.058
2.145	2.444	2.260	2.137	1.596	1.586	1.356	1.586	1.760	2.070	2.664
2.149	2.442	2.259	2.155	1.597	1.620	1.364	1.437	1.759	2.084	2.773
2.002	2.373	2.409	2.363	2.071	1.584	1.247	0.954	1.118	1.690	2.681
3.077	2.525	2.004	1.974	1.353	0.904	0.951	1.152	1.594	1.861	2.803
3.907	3.955	3.342	2.205	2.036	2.227	2.045	2.124	2.235	2.363	3.280
3.418	3.571	3.140	3.010	2.451	2.500	2.158	2.219	2.356	3.024	3.682
3.350	3.630	3.340	2.880	2.660	2.220	2.140	2.200	2.250	3.290	3.680
2.881	2.706	2.529	1.605	1.498	0.829	0.881	0.998	0.893	1.002	2.561



Cuadro 64. Continuación del cuadro 53.

TMPSTDMN12	PCPMM1	PCPMM2	PCPMM3	PCPMM4	PCPMM5	PCPMM6	PCPMM7	PCPMM8	PCPMM9	PCPMM10	PCPMM11	PCPMM12	PCPSTD1
1.396	15.680	4.910	1.620	1.770	100.130	465.070	400.690	396.600	514.000	274.600	36.530	16.230	5.104
3.561	14.230	24.330	12.660	18.350	100.780	195.200	183.030	165.600	185.550	51.480	17.140	5.260	3.518
2.371	10.450	10.380	5.820	19.820	139.890	270.520	315.980	322.430	324.250	128.920	12.880	8.920	2.363
2.516	1.730	13.450	7.380	34.900	72.180	132.930	131.450	96.080	150.290	61.580	10.660	6.410	0.548
2.277	9.270	7.850	3.830	15.540	108.640	281.570	288.870	316.530	305.240	120.360	15.650	6.990	2.551
2.630	15.050	15.990	16.770	28.670	141.340	517.710	439.990	493.850	494.080	243.560	40.180	23.990	3.880
2.640	9.920	5.460	17.700	25.750	76.770	141.640	128.050	133.180	137.360	38.130	22.540	12.090	1.350
3.570	9.640	6.434	9.349	28.326	89.362	163.452	113.875	100.032	131.304	51.961	24.011	5.664	1.912
1.480	30.580	32.120	32.240	52.380	95.400	182.410	149.760	147.100	141.690	67.970	37.580	24.890	3.520
4.101	3.683	4.275	5.144	15.846	85.739	172.879	109.117	101.707	154.149	58.296	16.346	6.294	1.406
3.036	7.440	4.350	5.220	14.240	60.350	143.930	104.130	104.260	168.870	53.790	18.730	2.610	2.479
1.949	16.450	22.670	12.930	23.420	69.860	159.170	167.020	168.030	158.230	108.190	35.940	11.740	4.581
1.684	2.250	5.280	9.110	14.970	50.150	148.700	87.280	80.200	106.140	21.640	8.270	0.500	0.906
2.684	5.391	7.091	12.017	29.410	53.214	153.511	125.390	103.912	156.192	69.872	21.442	5.077	1.533
1.735	11.860	18.230	12.370	20.410	115.130	256.140	203.940	219.230	249.350	86.970	8.920	4.910	2.374
1.610	35.370	33.690	39.690	78.440	177.100	383.600	280.450	314.080	333.960	146.130	47.330	28.520	5.250
2.517	3.639	4.878	6.532	21.282	55.653	133.139	84.079	55.174	113.531	29.576	10.355	7.611	1.038
3.002	7.847	6.368	4.725	24.179	92.755	171.750	184.461	208.853	184.102	71.422	16.705	5.253	2.721
2.629	7.823	6.183	4.863	23.607	79.358	166.674	142.679	163.530	143.627	44.353	21.531	11.984	1.794
2.585	5.450	15.360	14.270	27.680	88.090	130.000	86.640	106.230	105.860	29.680	17.840	5.050	1.132
2.692	5.450	15.360	14.270	27.680	88.090	129.250	89.360	82.500	105.910	29.590	16.750	5.140	1.132
1.864	7.240	10.450	8.610	33.650	93.860	200.270	175.280	154.200	204.970	80.460	11.380	7.750	2.594
2.588	15.450	28.490	18.790	64.680	306.350	421.850	384.220	386.640	373.380	171.200	42.450	12.230	3.803
3.519	5.555	12.936	14.002	34.634	71.439	134.597	114.864	93.775	107.445	33.775	14.816	6.650	1.630
3.555	4.128	4.277	6.053	21.453	62.705	155.449	102.480	84.860	137.192	49.597	15.894	0.936	1.113
3.420	11.090	10.990	13.920	29.700	86.270	183.550	180.120	151.460	142.210	63.440	16.880	7.280	2.280
2.886	4.690	11.690	8.690	6.430	48.150	247.070	286.520	306.720	309.980	91.810	10.660	6.290	1.104





Cuadro 65. Continuación del cuadro 53.

PCPSTD2	PCPSTD3	PCPSTD4	PCPSTD5	PCPSTD6	PCPSTD7	PCPSTD8	PCPSTD9	PCPSTD10	PCPSTD11	PCPSTD12	PCPSKW1	PCPSKW2	PCPSKW3
1.496	0.499	0.773	12.778	20.929	17.978	18.982	26.002	16.539	7.131	5.398	12.358	10.125	12.476
4.130	2.777	2.361	6.256	9.625	8.936	9.338	9.789	4.368	2.201	1.086	12.782	7.451	8.403
2.542	1.547	3.563	10.476	13.294	15.534	14.936	16.209	10.995	3.696	2.298	9.147	11.695	9.639
2.922	1.568	4.799	5.797	7.631	8.571	6.257	9.069	5.468	1.937	1.284	13.766	8.748	9.194
2.123	1.024	2.779	8.516	14.219	13.817	14.916	15.057	10.190	4.230	2.194	13.116	11.931	10.658
4.600	4.040	4.410	12.000	21.550	18.520	20.090	20.300	15.080	5.140	4.740	11.660	12.900	17.970
1.450	2.670	2.570	5.970	8.780	8.900	10.900	10.480	4.120	2.830	1.350	9.250	16.050	10.520
1.456	1.593	3.370	6.883	9.274	7.779	6.799	8.365	5.338	3.345	1.063	8.627	9.558	7.338
5.290	2.440	3.950	5.490	10.130	7.670	7.690	7.410	4.750	3.120	1.760	13.340	24.920	6.240
1.121	1.365	2.460	6.852	10.474	7.460	6.446	9.262	5.744	2.842	1.608	15.816	11.210	13.014
1.396	1.446	3.016	6.694	9.122	7.453	7.333	12.839	5.412	4.221	0.770	12.397	11.588	10.672
3.356	3.478	3.149	6.372	7.997	7.855	10.153	8.467	8.708	4.130	1.960	14.571	5.508	12.554
1.699	2.236	2.934	4.866	10.274	7.953	6.338	6.917	2.788	2.639	0.296	14.149	10.126	8.442
1.740	2.126	3.363	4.961	8.909	8.051	6.643	9.270	7.015	3.322	1.260	12.321	9.146	7.077
3.933	2.540	4.165	9.860	14.134	10.375	13.309	13.575	8.056	3.250	1.747	6.917	7.713	7.119
5.030	6.340	9.890	13.210	18.080	13.310	15.640	17.920	9.610	5.990	4.890	9.000	9.830	8.760
1.377	2.146	2.673	5.140	8.725	6.945	4.895	8.257	3.438	1.792	1.638	10.355	10.255	16.863
1.773	1.019	3.468	6.803	8.814	8.847	10.223	9.306	5.672	3.537	1.384	15.093	11.911	8.019
1.738	1.480	3.595	6.632	9.764	9.230	8.760	9.440	4.522	6.150	2.373	9.318	10.697	13.410
3.064	2.337	3.543	7.877	9.275	6.863	13.029	8.656	3.986	2.502	0.908	7.757	9.623	6.637
3.064	2.337	3.543	7.877	9.266	7.062	7.679	8.656	3.986	2.435	0.909	7.757	9.623	6.637
2.429	1.810	4.690	7.346	11.515	9.015	9.364	10.558	7.370	2.109	1.936	13.576	9.017	8.803
5.218	3.748	9.185	19.316	18.626	18.441	17.171	16.078	11.447	6.339	2.879	12.221	7.262	8.214
2.424	2.766	3.764	5.854	7.053	6.892	6.811	6.987	3.776	2.226	1.541	11.904	5.952	10.049
1.143	1.782	3.002	5.118	8.844	7.282	5.921	9.594	4.639	2.370	0.304	11.741	9.637	12.962
2.360	2.630	3.420	5.860	9.610	11.890	7.970	8.010	5.470	2.600	1.840	12.050	11.200	10.630
2.707	1.931	1.789	5.631	12.651	13.271	13.091	15.181	8.107	3.067	2.029	8.269	7.696	7.558



Cuadro 66. Continuación del cuadro 53.

PCPSKW 4	PCPSKW 5	PCPSKW 6	PCPSKW 7	PCPSKW 8	PCPSKW 9	PCPSKW1 0	PCPSKW1 1	PCPSKW1 2	PR_W1_ 1	PR_W1_ 2	PR_W1_ 3	PR_W1_ 4	PR_W1_ 5
16.370	5.458	1.753	1.751	2.015	3.073	2.279	7.988	13.051	0.021	0.016	0.012	0.009	0.110
4.497	2.493	2.360	2.112	3.355	2.172	3.705	5.126	7.665	0.050	0.060	0.031	0.074	0.210
6.336	2.721	1.901	2.343	2.175	2.146	4.186	14.783	9.498	0.027	0.051	0.015	0.039	0.221
5.960	4.128	2.399	2.983	3.008	2.397	3.103	8.058	6.921	0.012	0.055	0.027	0.079	0.229
6.758	3.401	2.309	2.278	2.138	2.313	3.467	14.492	13.850	0.027	0.033	0.018	0.036	0.206
7.230	4.290	1.900	2.050	1.890	1.850	2.930	6.090	11.030	0.030	0.040	0.020	0.040	0.170
4.410	3.780	3.020	4.570	4.880	4.480	4.990	7.190	9.410	0.010	0.020	0.040	0.070	0.170
5.309	4.060	2.668	3.204	3.055	2.675	5.151	6.455	8.061	0.033	0.034	0.052	0.088	0.143
4.560	2.670	3.790	2.690	2.690	2.300	3.980	5.510	6.650	0.030	0.050	0.040	0.080	0.190
8.787	3.745	3.185	2.907	2.870	2.866	4.978	6.480	9.859	0.016	0.024	0.019	0.069	0.152
8.716	5.100	2.775	3.146	2.983	5.234	4.096	9.776	12.011	0.015	0.020	0.015	0.029	0.119
5.163	4.358	2.040	2.087	3.596	2.856	5.149	4.047	6.215	0.034	0.086	0.018	0.071	0.175
8.806	3.741	3.002	3.882	3.498	2.429	4.912	13.285	18.466	0.009	0.010	0.009	0.032	0.109
4.561	4.029	2.945	2.969	3.178	2.795	4.522	7.007	11.903	0.014	0.032	0.037	0.098	0.143
7.191	4.289	2.710	2.357	3.232	2.806	5.946	15.745	13.867	0.028	0.034	0.018	0.041	0.183
6.180	4.260	2.690	2.340	2.410	3.540	2.970	5.800	9.000	0.060	0.060	0.050	0.090	0.220
5.224	4.188	2.842	3.522	3.972	2.978	4.951	7.514	8.895	0.011	0.019	0.019	0.082	0.122
6.528	2.992	2.092	1.857	2.033	1.893	3.103	9.234	10.198	0.014	0.022	0.025	0.067	0.130
5.853	3.352	2.376	2.984	2.295	2.827	3.768	13.937	6.874	0.029	0.026	0.020	0.072	0.115
5.764	3.752	3.629	3.447	9.879	3.834	6.020	6.651	8.642	0.027	0.063	0.047	0.101	0.165
5.764	3.752	3.646	3.370	5.303	3.834	6.021	7.027	8.604	0.027	0.063	0.047	0.101	0.165
6.684	3.332	2.459	1.960	3.364	2.125	4.969	6.739	10.123	0.027	0.034	0.031	0.076	0.222
5.903	2.731	2.020	2.572	1.734	1.984	2.689	6.310	9.387	0.037	0.063	0.031	0.069	0.255
4.394	3.544	1.931	2.374	2.821	2.404	4.734	5.628	9.257	0.013	0.035	0.030	0.095	0.128
6.329	3.654	2.325	3.479	3.691	4.043	3.854	5.518	12.419	0.016	0.020	0.022	0.071	0.118
5.380	2.830	2.760	7.580	2.840	2.510	4.630	6.620	15.910	0.030	0.040	0.040	0.110	0.180
8.804	4.663	1.722	1.820	1.454	1.906	4.395	10.926	11.511	0.024	0.027	0.015	0.012	0.055



Cuadro 67. Continuación del cuadro 53.

PR_W1_6	PR_W1_7	PR_W1_8	PR_W1_9	PR_W1_10	PR_W1_11	PR_W1_12	PR_W2_1	PR_W2_2	PR_W2_3	PR_W2_4	PR_W2_5	PR_W2_6	PR_W2_7	PR_W2_8
0.475	0.441	0.414	0.456	0.222	0.051	0.024	0.222	0.286	0.429	0.250	0.466	0.692	0.647	0.658
0.403	0.515	0.401	0.381	0.153	0.093	0.037	0.200	0.414	0.154	0.324	0.649	0.749	0.645	0.694
0.527	0.565	0.585	0.525	0.245	0.062	0.030	0.250	0.167	0.250	0.333	0.527	0.632	0.624	0.650
0.330	0.319	0.295	0.284	0.113	0.049	0.012	0.333	0.191	0.231	0.359	0.348	0.618	0.567	0.489
0.519	0.537	0.608	0.500	0.256	0.058	0.033	0.250	0.167	0.364	0.450	0.602	0.723	0.673	0.725
0.540	0.590	0.630	0.610	0.280	0.080	0.040	0.200	0.260	0.640	0.610	0.610	0.810	0.780	0.790
0.330	0.240	0.190	0.240	0.050	0.040	0.020	0.880	0.690	0.680	0.670	0.570	0.700	0.620	0.680
0.158	0.148	0.144	0.144	0.097	0.062	0.030	0.015	0.014	0.012	0.053	0.157	0.332	0.221	0.209
0.390	0.340	0.310	0.290	0.140	0.060	0.030	0.890	0.860	0.880	0.820	0.760	0.760	0.740	0.750
0.152	0.131	0.148	0.146	0.103	0.053	0.021	0.002	0.004	0.007	0.030	0.160	0.354	0.256	0.249
0.265	0.202	0.235	0.236	0.115	0.038	0.012	0.000	0.250	0.286	0.400	0.375	0.548	0.528	0.449
0.361	0.426	0.430	0.400	0.253	0.083	0.037	0.353	0.188	0.571	0.371	0.547	0.694	0.660	0.635
0.134	0.147	0.153	0.196	0.068	0.019	0.003	0.250	0.400	0.571	0.294	0.298	0.689	0.487	0.570
0.154	0.166	0.162	0.165	0.092	0.057	0.022	0.011	0.008	0.025	0.038	0.091	0.357	0.255	0.256
0.432	0.343	0.379	0.403	0.192	0.031	0.018	0.357	0.375	0.364	0.188	0.585	0.636	0.596	0.599
0.510	0.440	0.390	0.390	0.220	0.090	0.060	0.590	0.540	0.590	0.580	0.690	0.790	0.690	0.740
0.132	0.091	0.102	0.099	0.062	0.036	0.025	0.005	0.007	0.008	0.032	0.097	0.258	0.181	0.133
0.169	0.190	0.176	0.173	0.106	0.038	0.017	0.005	0.004	0.009	0.023	0.138	0.309	0.304	0.342
0.147	0.180	0.195	0.126	0.046	0.046	0.031	0.014	0.006	0.000	0.019	0.104	0.289	0.209	0.277
0.216	0.219	0.205	0.190	0.102	0.061	0.054	0.250	0.200	0.250	0.286	0.517	0.635	0.519	0.542
0.222	0.219	0.192	0.190	0.102	0.060	0.057	0.250	0.200	0.250	0.286	0.517	0.630	0.519	0.570
0.335	0.349	0.335	0.353	0.133	0.042	0.021	0.250	0.267	0.154	0.463	0.480	0.669	0.640	0.637
0.518	0.442	0.372	0.404	0.204	0.095	0.030	0.200	0.208	0.353	0.487	0.631	0.714	0.698	0.736
0.159	0.148	0.120	0.142	0.054	0.046	0.020	0.006	0.011	0.025	0.046	0.101	0.311	0.208	0.151
0.144	0.136	0.156	0.137	0.088	0.038	0.014	0.010	0.009	0.004	0.035	0.157	0.341	0.243	0.225
0.440	0.470	0.420	0.410	0.170	0.070	0.040	0.520	0.320	0.500	0.460	0.650	0.710	0.660	0.680
0.283	0.425	0.395	0.389	0.130	0.015	0.012	0.200	0.111	0.125	0.200	0.485	0.597	0.475	0.614



Cuadro 68. Continuación del cuadro 53.

PR_W2_9	PR_W2_10	PR_W2_11	PR_W2_12	PCPD1	PCPD2	PCPD3	PCPD4	PCPD5	PCPD6	PCPD7	PCPD8	PCPD9	PCPD10	PCPD11	PCPD12
0.688	0.589	0.000	0.111	0.820	0.640	0.640	0.360	5.270	18.910	18.000	17.820	18.640	11.730	1.640	0.820
0.681	0.535	0.263	0.071	1.820	2.640	1.180	3.090	11.910	19.180	19.180	18.090	17.360	7.820	3.450	1.270
0.667	0.473	0.095	0.000	1.090	1.640	0.730	1.640	10.000	18.270	19.090	20.270	19.090	10.180	1.910	0.910
0.566	0.485	0.238	0.364	0.550	1.910	1.180	3.550	8.360	14.270	13.640	11.910	12.360	6.000	1.910	1.000
0.754	0.456	0.050	0.000	1.090	1.090	1.000	1.820	10.730	20.360	20.000	22.180	21.090	10.360	1.820	1.000
0.780	0.640	0.460	0.470	1.290	1.320	1.740	2.870	9.340	22.970	23.420	24.130	23.000	14.680	4.260	2.180
0.700	0.760	0.790	0.880	3.570	1.750	4.000	5.890	9.290	16.250	12.790	12.140	14.250	6.640	5.680	4.930
0.285	0.096	0.061	0.016	2.000	1.000	2.000	4.000	9.000	15.000	11.000	11.000	13.000	6.000	4.000	1.000
0.780	0.750	0.820	0.880	8.210	8.850	9.320	10.970	14.940	19.470	18.820	18.000	18.290	12.210	9.120	8.120
0.348	0.113	0.028	0.008	1.000	1.000	1.000	3.000	10.000	15.000	12.000	12.000	15.000	7.000	2.000	1.000
0.603	0.364	0.200	0.167	0.450	0.730	0.640	1.360	5.090	11.450	9.820	9.730	11.910	5.000	1.360	0.550
0.649	0.466	0.350	0.300	1.550	2.910	1.270	3.180	8.640	16.640	18.180	17.450	16.820	10.550	3.640	1.820
0.595	0.344	0.143	0.000	0.360	0.450	0.640	1.550	4.270	9.640	6.910	8.450	10.090	2.910	0.640	0.090
0.370	0.124	0.047	0.011	1.000	1.000	2.000	4.000	7.000	15.000	13.000	13.000	16.000	7.000	3.000	1.000
0.661	0.547	0.091	0.000	1.270	1.450	1.000	1.450	9.640	16.730	15.090	15.640	16.910	9.640	1.000	0.550
0.770	0.640	0.420	0.240	4.100	3.880	3.750	5.470	13.130	22.130	19.230	19.600	19.850	12.880	4.550	2.470
0.231	0.072	0.033	0.012	1.000	1.000	1.000	3.000	7.000	12.000	8.000	7.000	10.000	4.000	2.000	1.000
0.333	0.116	0.014	0.006	1.000	1.000	1.000	3.000	8.000	14.000	15.000	16.000	15.000	7.000	2.000	1.000
0.253	0.085	0.005	0.002	1.000	1.000	1.000	3.000	7.000	13.000	12.000	15.000	11.000	4.000	2.000	1.000
0.623	0.319	0.412	0.250	1.090	2.270	1.820	3.820	7.910	11.450	9.820	9.730	10.360	4.270	3.090	2.180
0.623	0.304	0.375	0.240	1.090	2.270	1.820	3.820	7.910	11.550	9.820	9.730	10.360	4.180	2.910	2.200
0.667	0.602	0.364	0.200	1.090	1.360	1.180	3.730	9.270	15.360	15.910	15.550	16.360	8.450	2.000	0.910
0.774	0.592	0.194	0.167	1.360	2.180	1.550	3.550	12.820	20.000	19.270	19.270	20.550	10.910	3.270	1.090
0.199	0.079	0.030	0.008	1.000	1.000	2.000	4.000	7.000	14.000	11.000	8.000	10.000	4.000	2.000	1.000
0.275	0.102	0.038	0.000	1.000	1.000	1.000	3.000	9.000	15.000	12.000	12.000	12.000	6.000	2.000	0.000
0.670	0.590	0.260	0.210	2.200	1.850	2.450	5.050	11.250	18.700	18.880	18.480	17.500	9.730	2.750	1.520
0.564	0.391	0.167	0.000	0.910	0.820	0.730	0.450	3.000	12.640	14.550	16.730	14.820	5.820	0.550	0.360



Cuadro 69. Continuación del cuadro 53.

RAINHHMX1	RAINHHMX2	RAINHHMX3	RAINHHMX4	RAINHHMX5	RAINHHMX6	RAINHHMX7	RAINHHMX8	RAINHHMX9	RAINHHMX10	RAINHHMX11
3.588	1.196	0.598	0.598	16.744	34.685	32.891	31.096	37.077	23.322	7.774
2.392	2.990	2.392	1.794	9.568	19.734	18.538	19.136	17.342	5.382	2.990
1.196	1.196	0.598	3.588	14.950	22.126	30.498	34.685	33.489	20.332	2.392
0.598	1.794	2.033	5.382	9.568	14.352	14.950	10.166	11.960	8.372	2.392
1.196	1.794	0.598	1.435	13.156	31.694	31.096	32.891	34.685	17.342	2.990
1.010	1.010	1.230	3.430	11.020	23.530	19.100	17.250	21.050	8.500	2.080
1.010	1.010	1.230	3.430	11.020	23.530	19.100	17.250	21.050	8.500	2.080
1.446	0.965	1.402	4.248	13.403	24.515	17.079	15.003	19.694	7.793	3.601
1.010	1.010	1.230	3.430	11.020	23.530	19.100	17.250	21.050	8.500	2.080
0.552	0.641	0.771	2.376	12.858	25.927	16.364	15.253	23.118	8.743	2.451
1.196	0.598	0.718	1.435	7.176	13.156	10.764	11.482	17.940	7.176	3.588
2.392	2.990	1.794	2.033	8.970	16.146	16.744	19.734	14.950	13.156	2.990
0.359	0.478	0.718	1.794	7.176	16.146	6.578	7.176	9.568	2.990	1.196
0.799	1.050	1.780	4.357	7.883	22.742	18.576	15.394	23.139	10.351	3.176
1.794	1.914	1.435	4.186	17.342	25.714	19.734	23.920	26.312	10.764	1.435
1.010	1.010	1.230	3.430	11.020	23.530	19.100	17.250	21.050	8.500	2.080
0.762	1.021	1.367	4.455	11.651	27.872	17.601	11.550	23.767	6.192	2.168
0.882	0.716	0.531	2.718	10.428	19.309	20.738	23.481	20.698	8.030	1.878
1.054	0.833	0.655	3.181	10.695	22.462	19.229	22.039	19.356	5.977	2.902
1.196	2.392	1.794	3.588	11.960	9.568	10.166	16.744	13.156	4.784	2.990
1.196	2.392	1.914	2.990	9.568	14.352	11.960	13.156	13.754	4.784	2.990
1.435	1.555	1.196	4.784	11.362	25.116	17.940	19.136	25.116	10.166	1.794
2.751	5.382	3.229	8.970	30.498	38.273	35.881	33.489	34.685	19.136	5.980
0.948	2.208	2.390	5.911	12.193	22.973	19.605	16.005	18.338	5.765	2.529
0.704	0.729	1.032	3.659	10.693	26.510	17.477	14.472	23.396	8.458	2.710
1.010	1.010	1.230	3.430	11.020	23.530	19.100	17.250	21.050	8.500	2.080
1.196	1.794	1.196	0.359	2.751	19.734	23.920	25.116	28.704	9.568	1.196



Cuadro 70. Continuación del cuadro 53.

RAINHHMX12	SOLARAV1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12
2.392	18.543	21.086	23.701	25.397	24.473	21.955	22.238	22.066	20.854	19.887	18.079	17.750
0.598	18.961	21.342	24.733	26.643	25.473	22.157	21.682	21.342	19.289	18.466	17.865	17.466
1.196	19.266	21.627	24.027	25.037	23.720	20.576	20.627	20.263	18.175	18.045	18.046	17.905
1.196	18.630	20.899	23.738	25.411	24.330	21.786	21.526	21.623	19.699	18.921	18.203	17.230
1.196	18.856	21.349	24.196	25.575	23.903	21.435	21.300	21.027	19.083	18.442	17.680	17.455
0.770	18.710	21.010	23.420	23.150	20.520	17.750	18.920	18.110	16.680	18.680	18.980	18.250
0.770	18.490	20.840	23.100	22.560	20.040	17.280	18.740	18.000	16.110	18.150	18.420	17.840
0.850	18.186	20.880	23.574	23.815	22.374	19.204	19.950	19.344	17.658	18.598	18.295	17.444
0.770	18.890	21.210	23.550	23.190	20.510	17.910	19.120	18.230	16.780	18.740	19.060	18.370
0.944	18.725	21.361	24.192	25.087	24.278	21.941	23.103	22.579	20.585	20.663	19.528	18.259
1.196	20.129	22.585	25.905	27.345	26.239	24.330	24.149	24.348	21.859	21.121	20.068	19.156
1.794	16.667	18.323	21.171	22.878	22.059	20.836	20.492	20.832	19.184	18.389	16.988	16.035
0.179	18.107	20.595	23.882	27.719	26.996	25.266	23.707	23.638	22.620	20.453	18.019	16.758
0.752	18.888	21.451	24.127	24.647	23.129	20.786	22.028	21.355	19.577	20.159	19.519	18.430
1.196	17.340	19.731	22.045	23.441	22.353	19.740	20.566	20.955	19.452	18.668	17.410	16.473
0.770	18.950	21.250	23.630	23.300	20.550	17.930	19.080	18.190	16.870	18.850	19.190	18.460
1.593	18.135	20.897	23.723	24.321	23.405	20.377	21.131	20.668	18.739	19.187	18.407	17.402
0.591	18.706	21.237	24.154	25.062	23.802	21.269	22.180	21.627	20.154	20.488	19.552	18.320
1.615	18.712	21.244	24.159	25.068	23.813	21.290	22.205	21.651	20.173	20.500	19.561	18.327
1.196	17.556	20.091	23.399	24.829	24.125	20.915	19.956	19.973	18.357	17.648	16.787	15.908
1.794	17.503	20.061	23.382	24.800	24.121	20.902	19.929	19.963	18.343	17.591	16.814	15.991
1.196	15.332	18.053	20.976	23.018	22.396	19.592	18.908	18.647	17.224	16.268	15.225	14.157
1.196	18.058	20.719	23.488	24.650	23.826	21.694	22.007	21.636	19.975	19.150	18.074	17.146
1.135	18.169	20.836	23.464	23.549	21.951	18.700	19.422	18.777	17.184	18.324	18.197	17.411
0.160	18.901	21.374	23.892	24.035	21.962	19.506	20.710	19.927	18.448	19.566	19.401	18.461
0.770	19.030	21.340	23.590	23.090	20.330	17.900	19.300	18.320	16.800	18.770	19.120	18.480
0.598	16.307	18.915	22.571	25.438	25.259	23.821	23.300	22.272	20.097	17.805	16.103	15.192



Cuadro 71. Continuación del cuadro 53.

DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12	WNDVAV1	WNDVAV2	WNDVAV3
21.600	22.180	22.050	23.060	22.930	21.770	21.490	20.830	21.180	21.440	22.160	22.120	2.160	2.225	2.274
7.510	9.500	11.030	11.480	12.960	12.790	12.340	12.120	12.260	11.020	9.050	7.830	2.457	2.385	2.332
19.570	20.300	21.500	23.130	23.420	22.520	21.770	21.780	21.680	21.910	20.770	19.980	2.420	2.442	2.466
12.780	13.770	16.190	17.400	18.070	17.010	16.040	16.150	16.090	15.550	14.210	13.430	2.348	2.253	2.180
20.360	21.250	21.400	22.910	23.300	22.740	22.140	22.170	22.140	22.010	21.800	20.710	2.637	2.558	2.485
14.430	15.790	20.950	21.770	22.490	22.200	20.510	18.370	16.740	15.830	14.180	13.030	2.410	1.980	1.770
10.270	10.780	15.230	16.380	17.150	17.380	15.620	14.210	13.350	11.740	9.960	8.850	2.320	1.820	1.830
4.120	4.329	5.833	7.400	9.861	11.053	10.720	10.528	11.043	9.022	7.405	5.394	2.500	2.700	2.700
7.030	8.070	12.650	13.240	13.800	13.650	11.990	10.120	8.600	7.540	6.270	5.670	2.400	1.920	1.760
11.195	11.177	12.732	14.773	16.407	17.293	17.145	17.338	16.886	15.466	13.440	11.655	2.400	2.700	2.700
15.690	16.910	18.790	20.300	20.740	20.010	18.740	18.840	18.750	18.060	16.690	16.200	2.438	2.386	2.398
11.590	11.790	12.890	13.810	14.170	13.760	13.150	13.360	13.440	13.160	12.360	12.050	2.164	2.158	2.188
10.160	11.150	12.560	14.450	14.100	12.620	11.780	11.890	11.880	11.150	10.580	10.000	2.493	2.559	2.575
8.785	7.925	8.640	9.549	11.150	12.083	11.924	15.102	12.621	11.699	10.356	9.528	2.300	2.600	2.700
18.120	18.140	18.950	19.910	19.650	18.970	18.610	18.620	18.370	18.140	18.850	18.520	2.395	2.388	2.394
11.170	12.410	17.240	17.820	18.000	17.900	16.440	14.260	12.120	11.850	11.010	10.230	2.520	2.050	1.760
5.954	5.889	6.849	8.412	10.331	11.339	11.103	11.007	11.428	9.812	8.163	6.713	2.500	2.800	2.700
11.237	12.044	13.835	16.253	17.692	18.206	16.886	16.789	16.711	14.620	12.636	11.309	2.200	2.500	2.500
12.281	12.327	13.460	14.843	16.458	17.434	16.983	16.789	17.002	15.680	14.360	13.024	2.200	2.500	2.500
9.230	10.250	12.870	14.050	14.640	13.470	12.740	12.830	12.980	11.770	10.320	9.680	2.767	2.752	2.678
9.230	10.250	12.870	14.050	14.640	13.460	12.730	12.730	12.980	11.780	10.450	9.680	2.799	2.830	2.788
13.570	14.030	16.260	17.430	17.220	15.960	15.130	15.240	15.090	14.710	13.810	13.680	2.360	2.324	2.356
14.040	15.540	16.910	17.450	17.630	17.140	17.020	16.900	16.550	16.610	15.440	14.860	2.390	2.315	2.264
5.337	5.350	6.295	7.400	9.579	10.957	10.911	10.911	11.236	9.593	7.784	6.336	2.500	2.700	2.700
10.049	10.154	11.753	13.423	15.380	16.277	16.043	16.139	16.276	14.618	12.661	11.150	2.300	2.600	2.600
4.010	5.650	10.480	11.910	12.980	13.350	11.580	9.960	8.620	6.990	4.270	2.820	2.380	1.840	1.730
20.680	21.510	23.120	24.110	24.560	23.940	23.280	22.860	22.950	22.730	21.290	20.790	2.557	2.577	2.597



Cuadro 72. Continuación del cuadro 53.

WNDVAV4	WNDVAV5	WNDVAV6	WNDVAV7	WNDVAV8	WNDVAV9	WNDVAV10	WNDVAV11	WNDVAV12
2.216	1.959	1.625	1.790	1.759	1.596	1.839	2.040	2.096
2.161	1.857	1.738	1.983	1.938	1.815	2.130	2.422	2.451
2.353	2.032	1.675	1.825	1.801	1.666	1.965	2.256	2.343
1.978	1.668	1.793	2.266	2.200	1.997	2.277	2.451	2.391
2.363	2.083	2.164	2.698	2.613	2.322	2.578	2.764	2.697
1.940	1.930	1.790	2.090	2.360	2.380	2.370	2.380	2.270
2.130	2.110	1.930	2.180	2.380	2.350	2.250	2.220	2.080
2.200	2.100	2.000	2.000	2.000	1.900	2.400	2.500	2.400
1.970	1.950	1.810	2.100	2.360	2.380	2.350	2.340	2.210
2.200	2.100	2.000	2.000	2.000	1.900	2.300	2.300	2.200
2.362	2.109	1.944	2.229	2.164	1.957	2.283	2.521	2.481
2.134	1.907	1.758	1.853	1.833	1.740	1.995	2.192	2.138
2.437	2.223	2.274	2.653	2.579	2.352	2.501	2.542	2.451
2.100	2.000	2.000	2.000	2.000	1.900	2.200	2.300	2.200
2.257	1.922	1.602	1.744	1.721	1.603	1.910	2.233	2.322
1.890	1.880	1.770	2.100	2.410	2.480	2.480	2.500	2.370
2.200	2.100	2.000	2.000	2.000	2.000	2.400	2.500	2.400
2.000	2.000	1.900	1.900	1.900	1.800	2.100	2.100	2.000
2.000	2.000	1.900	1.900	1.900	1.800	2.100	2.100	2.000
2.529	2.303	2.471	3.039	2.948	2.616	2.789	2.873	2.792
2.635	2.415	2.526	3.023	2.936	2.621	2.789	2.864	2.792
2.340	2.110	1.911	2.145	2.086	1.895	2.215	2.439	2.398
2.081	1.733	1.540	1.773	1.724	1.599	1.945	2.299	2.364
2.100	2.000	1.900	2.000	2.000	1.900	2.300	2.400	2.400
2.000	2.000	1.900	1.900	1.900	1.800	2.200	2.300	2.200
1.960	1.940	1.800	2.100	2.360	2.380	2.310	2.280	2.130
2.478	2.136	1.751	1.911	1.886	1.746	2.073	2.388	2.484





## Anexo 6. Estimación de variables

### 10.1.1. Aspecto

El aspecto u orientación es la dirección que tienen las diferentes caras de la superficie del terreno (Norte, Sur, Este, Oeste e intermedias entre ellas), (Puerta, 2011).

En otras palabras, la orientación es la dirección de la tasa máxima de cambio en el valor z de cada celda en una superficie de ráster.

La orientación de una superficie afecta normalmente a la cantidad de luz solar que recibe (como ya ocurre con la pendiente). En latitudes del norte, los lugares con una orientación sur tienden a ser más cálidos y secos que aquellos con una orientación norte. La orientación se expresa en grados positivos de 0 a 359.9, medidos en el sentido de las agujas del reloj desde el norte. A las celdas del ráster de entrada que son planas, sin pendiente, se les asigna una orientación de -1.

#### 10.1.1.1. Procedimiento en ArcGIS

Se utilizó el módulo de ***Spatial Analyst tools*** → ***Surface*** → ***aspect***

### 10.1.2. Curvatura

Felicísimo (1994) describe la curvatura en un punto, h, puede definirse como la tasa de cambio en la pendiente y depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud (es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto).

Esencialmente la curvatura es la segunda derivada de la superficie, o la pendiente de la pendiente. Los valores negativos indican que las superficies son cóncavas (dirigidos hacia arriba) “forma de jofaina o copa” y se asocian con deposición. Los valores positivos indican que las superficies son convexas “corcova o joroba” y se asocian con remoción. Los valores 0 indican superficies planas, de esta forma los valores negativos se pueden asociar con una mayor capacidad de infiltración, en tanto que los valores positivos favorecen el transporte del agua, (Catie, 2007).

Hay dos tipos de curvatura: la curvatura del perfil y la plana; la primera está en la dirección de la pendiente máxima y la curvatura plana es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima.

Las partes convexas de las superficies, como las cadenas montañosas, aparecen por lo general expuestas y drenan otras áreas. Las partes cóncavas de la superficie, como los canales, se hallan más resguardadas y aceptan el drenaje proveniente de otras áreas.

#### 10.1.2.1. Curvatura plana u horizontal



La curvatura plana influye en la convergencia y divergencia de las corrientes. En la curvatura plana, los valores negativos pueden ser interpretados como indicativos de flujo convergente. Los valores positivos indican flujo divergente dentro de la celda. Los valores de cero indican no cambio (de nuevo no necesariamente plano), (Catie, 2007).

#### 10.1.2.2. Curvatura de perfil o vertical

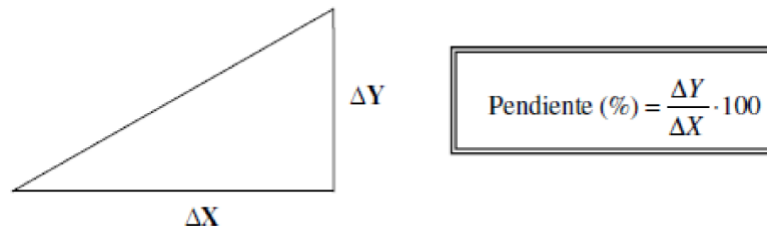
La curvatura de perfil afecta a la aceleración y desaceleración de las corrientes, que a su vez influyen en la erosión y deposición. La curvatura de perfil es una medida de la tasa de cambio de la curvatura en la dirección de la pendiente mayor a través de la celda. Los valores negativos pueden ser interpretados como indicativos de desaceleración del flujo en la celda. Los valores positivos indican aceleración del flujo, valores de cero indican no cambio (no necesariamente plano), (Catie, 2007).

#### 10.1.2.3. Procedimiento en ArcGIS

Se utilizó el módulo de **Spatial Analyst tools** → **Surface** → **curvature**

#### 10.1.3. Pendiente

El concepto de pendiente en sí, es la relación que existe entre el desnivel ( $\Delta Y$ ) y la distancia en horizontal ( $\Delta X$ ) que debemos recorrer. Se expresa en % o en grados.



#### 10.1.3.1. Procedimiento en ArcGIS

Se utilizó el módulo de Spatial Analyst tools → Surface → slope

#### 10.1.4. Índice topográfico de humedad

Es una variable que define la tendencia de una celda a acumular agua (Gruber y Peckham, citado por Leiva, 2012). Está relacionada con la humedad del suelo y refleja la tendencia de éste a generar escorrentía; relaciona la dirección y acumulación de flujo, representadas por el área de captación o área de acumulación,  $A_s$  con la pendiente del terreno,  $\beta$ .

Este índice se calcula de la expresión (Beven y Kirkby, 1979):



$$TWI_i = \ln \left[ \frac{As_i}{\tan \beta_i} \right] \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

$As_i$  = es el área de acumulación de flujo en la celda i

$\beta_i$  = es la pendiente local en la celda i

Esta variable es un atributo compuesto del terreno ya que proviene de dos primarios. Cuando el área de captación se incrementa y el gradiente decrece, el índice de humedad y el contenido de humedad del suelo decrecen. Al combinar datos sobre gradiente y área de captación, dicho índice toma en cuenta tanto la geometría de la pendiente local como la localización del sitio en el paisaje. Por lo tanto, correlaciona mejor con la humedad del suelo que con el área específica. El índice de humedad controla las acumulaciones de flujo, la humedad del suelo, profundidad de la tabla de agua, evapotranspiración, profundidad del suelo, materia orgánica, contenido de limos y arenas, distribución de la cobertura vegetal; por lo tanto es muy útil en estudios de vegetación, agricultura, hidrología y geomorfología (Kienzle, citado por Leiva, 2012).

Así pues, cuanto más elevado sea el TWI, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica (Peckham, citado por Castro et. al. 2012).

#### 10.1.4.1. Procedimiento en ArcGIS

Para obtener el TWI en ArcGIS se siguieron los siguientes pasos:

- a) Se calculó la dirección del flujo mediante el módulo **Spatial analyst tools** → **Hydrology** → **flow direction**.
- b) A partir del raster de dirección de flujo se obtuvo el raster de flujo acumulado mediante el módulo **Spatial analyst tools** → **Hydrology** → **flow accumulation (flow\_ac)**.
- c) Se calculó la pendiente en grados a partir del mde; una vez elaborado el raster de pendientes, a través de **raster calculator**, se multiplicó por  $\pi/180$  para convertir de grados a radianes; a este raster se le llamó "slp\_r"
- d) Posteriormente mediante raster calculator se calcula la tangente de la pendiente en radianes solo si la pendiente es mayor que cero de lo contrario que solo tenga valor de 0.001; para ello se colocó la siguiente condición en raster calculator:  $\tan\_slp = \text{con}(\text{slope} > 0, \tan(\text{slp\_r}), 0.001)$
- e) Para obtener el área de acumulación de flujo, se sumó una unidad al raster de **flow accumulation** y se multiplicó por el tamaño de pixel quedando la expresión:  
 $a = (\text{flow\_ac} + 1) * 15$

f) Finalmente se aplicó la fórmula quedando:  $TWI = \ln(a / \tan\_slp)$ .

### 10.1.5. Índice de posición topográfica

El índice de posición topográfica se considera una variable ligeramente definida para caracterizar la topografía local con relación a su contexto espacial. Numerosos procesos físicos asociados con el crecimiento y ocurrencia de especies vegetales, propiedades del suelo y tipos de suelos, están correlacionados con la posición topográfica (Coops *et al.*, citado por Leiva, 2012).

La importancia de este concepto radica en la clasificación de geoformas, ya que ésta se basa tanto en la morfología como en la posición relativa del terreno. Tradicionalmente se han usado métodos análogos, a partir de mapas de contorno, para clasificar las geoformas. Hoy en día el punto de partida para el análisis de geoformas se basa en datos de elevación, ya que contienen implícitamente información sobre la forma, orden vertical y magnitud de los rasgos del relieve (Leiva, 2012).

#### 10.1.5.1. Procedimiento en ArcGIS

Para obtener el raster del índice de posición topográfico se descargó e instaló en ArcGIS la herramienta **Land facet corridor**<sup>8</sup>, una vez instalada se utilizó el apartado **Topographic position index tools** en la pestaña **Calculate TPI raster** donde como dato de entrada el modelo digital de elevaciones con un radio de 10.

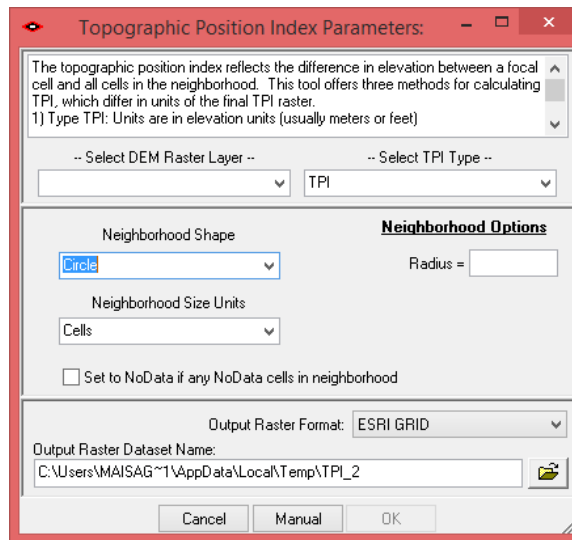


Figura 57. Ventana de parámetros del Índice de posición topográfica.

### 10.1.6. Longitud de la pendiente

<sup>8</sup> Disponible para su descarga en: [http://www.jennessent.com/arcgis/land\\_facets.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm)

La longitud de la pendiente se define como la distancia del parteaguas o punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde el gradiente de la pendiente disminuye lo que provoca el depósito o bien donde el escurrimiento llega a una corriente superficial de un cauce definido.

### 10.1.6.1. Procedimiento en ArcGIS

Para obtener la longitud de la pendiente en ArcGIS se procedió como sigue:

- En primer lugar se calculó la dirección del flujo mediante el módulo **Spatial analyst tools** → **Hydrology** → **flow direction**, donde como raster de entrada se colocó el modelo digital de elevaciones.
- Posteriormente se abrió el módulo **Spatial analyst tools** → **Hydrology** → **flow length**, donde se abrió una ventana como la siguiente:

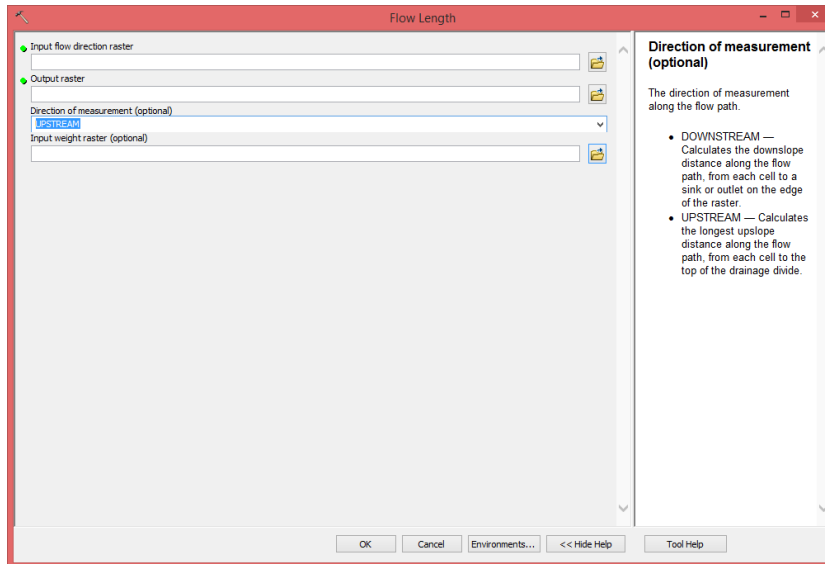


Figura 58. Ventana para el cálculo de la longitud de la pendiente.

- En la cual se utilizó como entrada el raster de dirección de flujo creado en el paso “a”, y en el campo **Direction of measurement** se colocó la dirección **UPSTREAM**, la cual calcula la longitud de la pendiente de manera ascendente de cada celda hasta el parteaguas.

### 10.1.7. Precipitación

Los factores geográficos tienen enormes repercusiones en cualquier parámetro climático, bien sea térmico o pluviométrico. Es por ello que para obtener el comportamiento de la precipitación en la cuenca, se llevó a cabo la aplicación de una técnica de interpolación geostatística basado en una regresión múltiple utilizando factores geográficos.



El uso de la regresión múltiple se utilizó debido a que se basa en un análisis multivariante que consiste en relacionar todas las variables independientes (factores) con la variable dependiente (hecho natural), evaluándolas simultáneamente en diferentes situaciones, combinaciones y magnitudes (Clorinda Palafox, 1986).

En este sentido, los factores geográficos que ejercen la mayor influencia sobre la variación de la precipitación se utilizaron como variables dependientes, los cuales se detallan en el Cuadro 73.

**Cuadro 73.** Descripción de los factores que influyen sobre la distribución de la precipitación.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Altitud	Con la altitud aumentan las precipitaciones, pues a medida que las masas de aire ascienden se enfrían y favorecen la condensación del agua y la producción de lluvias.
Latitud y Longitud	Las precipitaciones se distribuyen de forma desigual en el planeta debido a la latitud. Las áreas próximas al ecuador, que son más cálidas y tienen grandes cantidades de vapor de agua, registran más lluvias que las zonas templadas y las regiones polares. Estas últimas presentan escasa cantidad de vapor de agua y bajos niveles de evaporación.
Distancia al mar	Los lugares cercanos al mar tienen la influencia directa del mismo lo que permite el ingreso de masas de aire que favorecen precipitaciones, por lo tanto el clima va a ser húmedo y templado por la acción del mar. Una localidad que esté alejada del mar o protegida por una cadena montañosa se verá impedida del ingreso de las masas de aire ocasionando un clima más seco y árido.

#### 10.1.7.1. Procedimiento

- Como primer paso se seleccionaron las estaciones climáticas que estuvieran operando dentro y fuera de la cuenca; consecutivamente estas se rectificaron mediante el empleo de google earth, quedando un total de 57 estaciones meteorológicas.
- Posteriormente para cada de ellas se obtuvo su precipitación media anual, altitud, latitud, longitud y distancia al mar de cada estación.
- Para obtener los valores de distancia al mar, se utilizó la herramienta **NEAR** ubicada en la caja de herramientas de ArcGIS 10 en **Analysis Tools** → **Proximity**, donde en el campo de Input features se colocó el shape de las estaciones seleccionadas y en el campo **Near features** el shape del límite costero.

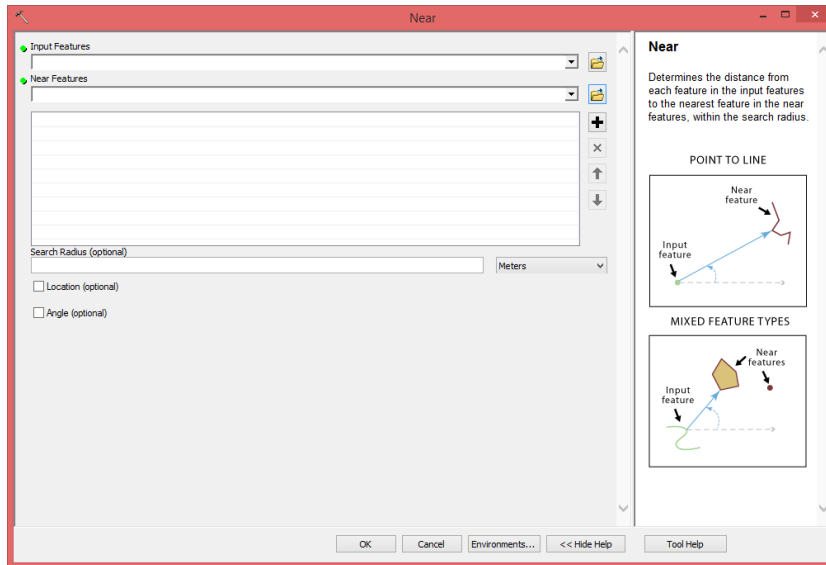


Figura 59. Ventana de la herramienta Near en ArcGIS 10.

- d) Una vez hecho lo anterior, se corrió la regresión lineal múltiple a través del programa Excel mediante la herramienta **Análisis de datos** considerando para este como variables independientes los factores distancia al mar, altitud, latitud y longitud y como variable dependiente la precipitación.
- e) Como resultado de la regresión se obtuvo la siguiente función:

$$y = -84312.32 - 3389.52X_1 - 1440.71X_2 + 25.48X_3 \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

$y$  = Precipitación media anual (mm)

$X_1$  = Latitud (decimal)

$X_2$  = Longitud (decimal)

$X_3$  = Distancia al mar (km)

La cual arrojó un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.84 y un coeficiente de correlación múltiple de 0.92, lo cual indica un muy buen ajuste.

- f) Posteriormente se crearon los raster de latitud, longitud, altitud y distancia al mar, mediante la herramienta de ArcGIS 10, **Point to Raster**, ubicada en las herramientas de conversión, usando como dato de entrada el shape de las estaciones meteorológicas seleccionadas y como **value field** el campo de cada factor, con un tamaño de pixel de 15.
- g) Finalmente, para crear el raster de precipitación se hizo algebra de mapas en ArcGIS 10, mediante la herramienta **Raster Calculator** de **Spatial Analyst**, donde se aplicó la función obtenida.



### 10.1.8. Temperatura

La temperatura atmosférica es el indicador de la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire. Aunque existen otras escalas para otros usos, la temperatura del aire se suele medir en grados centígrados (°C) y, para ello, se usa un instrumento llamado "termómetro".

Para crear el raster de temperatura se efectuó una regresión lineal simple, tomando a la altitud como el factor que más influye en la temperatura.

**Cuadro 74.** Descripción de los factores que influyen sobre la distribución de la temperatura.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Altitud	La temperatura de la atmósfera va disminuyendo a medida que se establece mayor distancia respecto de la tierra. Esto se debe al hecho de que las capas de la troposfera se van calentando desde lo más cercano a la tierra, hacia arriba. Por ejemplo, en la cima de una montaña, la temperatura siempre va a ser menor que en la base de ella. La temperatura de un lugar depende directamente de la altitud, pues cada mil metros esta disminuye 6°C.

#### 10.1.8.1. Procedimiento

- Para las 57 estaciones meteorológicas, dentro y fuera de la cuenca, se obtuvo la temperatura media anual y su altitud.
- Posteriormente se corrió la regresión lineal simple tomando como variable independiente la altitud en metros (X) y como variable dependiente la temperatura en °C (y).
- Producto de la regresión se obtuvo la siguiente función:  $y = 29.503 - 0.005X$ , con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.9 y un coeficiente de correlación de 0.95, lo cual indica un muy buen ajuste.
- Finalmente, para crear el raster de temperatura se hizo algebra de mapas en ArcGIS 10, mediante la herramienta **Raster Calculator** de **Spatial Analyst**, donde se aplicó la función obtenida tomando como raster de altitud el modelo digital de elevaciones.

### 10.1.9. Densidad de drenaje

Es la longitud de los cauces presentes en el mapa de la cartografía base a una determinada escala, por el área de la unidad hidrográfica. Caracteriza la red fluvial, y es una expresión de la textura fluvial o grado de disección de las cuencas en un territorio.



La densidad de drenaje expresa las características geo-ecológicas del territorio de la cuenca. Los factores que controlan la densidad de drenaje son: Litología del sustrato, permeabilidad del suelo, capacidad de infiltración y cobertura vegetal.

Estas características deben evaluarse en forma global ya que una alta densidad de drenaje expresa materiales geológicos disgregables, suelos relativamente impermeables o escasa cobertura vegetal. Constituye por lo tanto un indicador del potencial de erosividad intrínseco al territorio en estudio.

### 10.1.9.1. Procedimiento en ArcGIS

- Como primer paso se generó la red de corrientes de la cuenca escala 1:20,000, para ello se utilizó la herramienta **hydrology** de **Spatial Analyst** ubicada en la caja de herramientas de ArcGIS 10, donde creamos un mapa de dirección de flujo, usando la herramienta **flow direction**, colocando en **Input Surface raster** el modelo digital de elevaciones el cual previamente se corrigió.
- Posteriormente se creó el mapa de acumulación de flujo, usando la herramienta **Flow Accumulation**, donde en **Input Surface raster** se colocó el mapa de dirección de flujo creado en el punto anterior.
- A continuación se clasificaron las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado como celdas pertenecientes a la red de flujo. Para ello se empleó la herramienta **raster calculator**, donde se escribió la expresión siguiente: **con (FlowAcc > 111, 1)**.

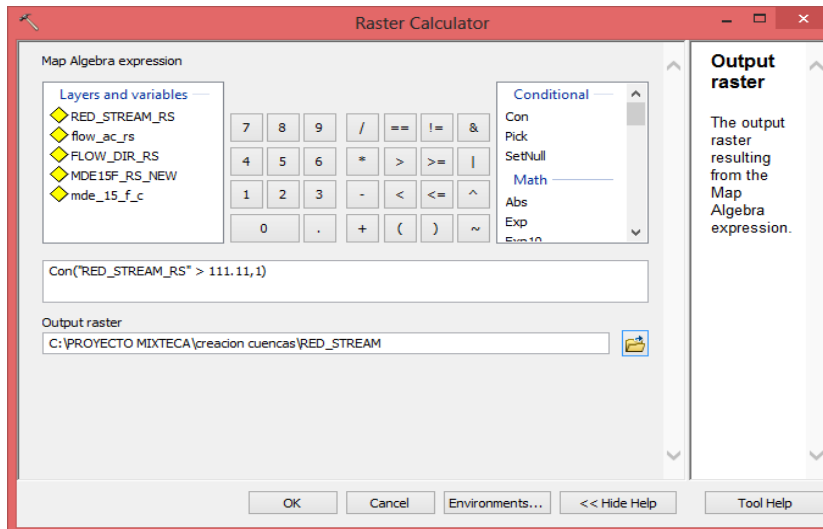


Figura 60. Herramienta raster calculator.

- Posteriormente se dividió el cauce en segmentos no interrumpidos mediante la herramienta **Stream Link**.

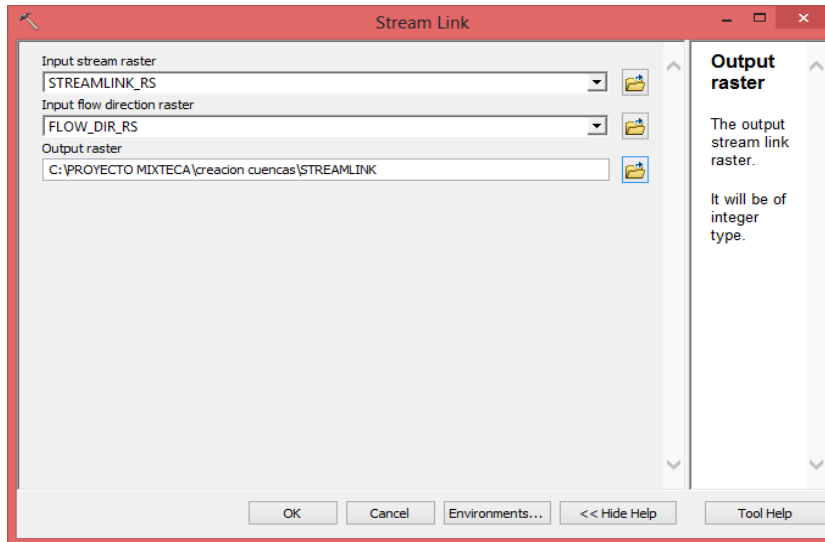


Figura 61. Ventana de la herramienta stream link en ArcGIS 10

- f) Posteriormente la red de drenaje se convirtió a formato shape mediante la herramienta **Stream feature**.
- g) Como siguiente paso se determinaron los puntos donde se cortan cada uno de los drenajes, para este caso nos interesan los puntos finales que es donde hay acumulación de flujo y es el punto importante para definir las cuencas. Para ello se utilizó la herramienta **Feature Vertice To Point** donde en el campo **Point Type** se seleccionó la opción **END** que agrega los puntos al final de cada tramo de corriente.

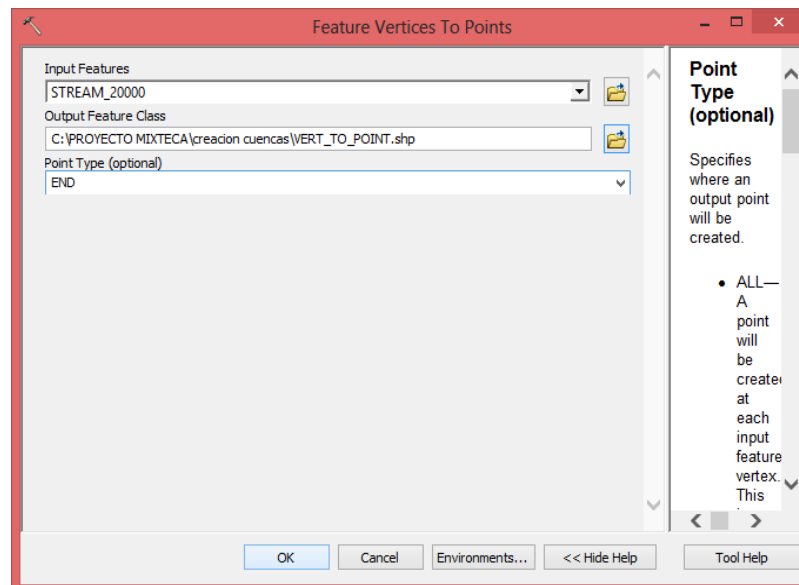


Figura 62. Ventana de la herramienta Feature vértices to points



- h) Finalmente se crearon las subcuencas mediante la herramienta **Watershed Delineation**, la cual delinea una subcuenca por cada uno de los segmentos de cauce definidos en el paso anterior.
- i) Una vez obtenidas las subcuencas y la red de drenaje, se obtuvo la longitud total de la red de drenaje en Km por subcuenca, así como el área por cada subcuenca en Km<sup>2</sup>.
- j) Mediante **field calculator** se hizo una división entre la longitud de los cauces y el área de cada subcuenca, obteniendo de este modo la densidad de drenaje para cada una de las subcuencas.

#### 10.1.10. Distancia a picos

Distancia a picos se le denominó a la variable que se utilizó para ubicar a los luvisoles, los cuales se originan en los lechos de cenizas y rocas volcánicas meteorizadas.

Por tal motivo, se creó un raster de distancias de las partes más altas que existen en las zonas donde se encuentran rocas ígneas y metamórficas.

##### 10.1.10.1. Procedimiento en ArcGIS

- a) En primer lugar se creó un mapa del índice de posición topográfica (TPI) mediante la herramienta **Land Facet Corridor Tools** en su apartado **Topographic Position Index Tools** → **Topographic Position, 6-Category** la cual crea un raster TPI con una clasificación de seis categorías: valles, laderas, laderas suaves, laderas empinadas, laderas altas y crestas.
- b) Del raster anterior, se seleccionaron únicamente las crestas y se creó un nuevo raster.
- c) Por otro lado a partir del mapa de geología del INEGI (1980), se ubicaron las zonas de rocas ígneas y metamórficas y se creó un shape con estas.
- d) Se seleccionaron las crestas ubicadas dentro del shape de rocas ígneas y metamórficas y se creó un nuevo raster con estas crestas, las cuales son las que representan las zonas volcánicas dentro de la cuenca.
- e) Como siguiente paso se creó el raster con las distancias hasta las crestas, mediante la herramienta **Euclidean Distance**, tomando en el campo **Input raster o feature source data** el raster de crestas creado en el punto d.



### Anexo 7. Cálculo de la precipitación máxima mensual en 30 minutos

La precipitación máxima en media hora es un dato que requiere el modelo SWAT para alimentar al generador climático y se define como la cantidad máxima de precipitación teórica para una duración dada que es físicamente posible de ocurrir sobre una cuenca en un cierto tiempo del año (AMS, 1959).

Para estimar la precipitación máxima mensual en media hora se procedió como sigue:

Se obtuvieron los datos diarios de precipitaciones de las estaciones meteorológicas seleccionadas en el apartado de hidrología (5.1.7).

Se completó la base de datos de la serie histórica de cada estación donde existían datos faltantes por el método del cuadrado del inverso de la distancia.

Para cada estación, se obtuvieron las precipitaciones máximas de cada mes. A manera de ejemplo se muestra en la Cuadro 75, la serie de datos de lluvia máxima en 24 horas para la estación San Juan Cacahuatpec (CFE), clave 20 010.

**Cuadro 75.** Datos de lluvia máxima en 24 horas para la estación San Juan Cacahuatpec (CFE), clave 20 010.

Año	Precipitación máxima mensual											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1975	10	0.0	0.0	0.0	60.5	100.0	60.4	55.5	207.6	55.0	7.5	0.0
1976	0	0.0	0.0	0.0	45.7	60.7	60.7	15.0	85.0	70.5	8.4	8.5
1977	0	0.0	0.0	0.0	85.4	65.3	65.8	31.4	89.4	90.5	85.9	0.0
1978	0	0.0	0.0	13.5	70.5	60.5	64.5	77.5	59.0	45.5	29.0	81.0
1979	8.5	0.0	0.0	0.0	35.5	45.5	55.0	98.5	46.5	62.5	24.0	7.0
1980	62.5	1.0	0.0	1.0	14.0	70.5	42.5	80.0	130.5	19.0	0.0	0.0
1981	6	0.0	0.0	0.0	67.0	78.0	40.5	93.5	128.5	47.5	42.0	0.0
1982	0	6.0	0.0	1.5	106.5	78.5	95.5	35.0	74.5	36.5	25.5	10.0
1983	0	18.5	1.5	0.0	8.0	100.5	83.5	85.5	82.5	60.5	35.0	6.5
1984	0	15.0	4.8	0.0	8.6	21.5	17.6	12.4	26.0	4.3	2.0	0.0
1985	68.5	0.0	7.5	0.0	15.5	39.5	98.0	56.0	55.0	80.5	55.5	0.0

Se estimó la precipitación máxima mensual en 24 h para los periodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años; para ello se ajustaron las precipitaciones máximas de cada mes a la función de distribución Gumbel tipo I, recomendada para ajustar los datos de precipitación por presentar un error estándar menor (Linsley *et al.*, 1977).

**Cuadro 76.** Precipitación máxima mensual en 24 h obtenida para diferentes periodos de retorno mediante la distribución Gumbel tipo I para la estación San Juan Cacahuatpec (CFE), clave 20010.

T (Años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
500	145.34	38.11	14.16	22.01	219.05	188.69	184.74	217.14	346.95	182.12	160.10	131.73
200	124.13	32.55	12.07	18.69	191.24	168.78	164.93	191.45	305.33	161.09	138.85	112.10
100	108.05	28.33	10.49	16.17	170.16	153.68	149.91	171.98	273.78	145.15	122.74	97.22
50	91.92	24.09	8.90	13.64	149.00	138.53	134.84	152.43	242.12	129.15	106.57	82.28



25	75.66	19.83	7.30	11.09	127.69	123.27	119.65	132.74	210.23	113.03	90.28	67.23
10	53.75	14.08	5.15	7.66	98.96	102.69	99.19	106.19	167.23	91.30	68.32	46.95
5	36.41	9.53	3.44	4.94	76.22	86.41	82.99	85.19	133.20	74.11	50.94	30.89
2	10.21	2.65	0.87	0.84	41.87	61.82	58.52	53.46	81.81	48.14	24.69	6.64

La precipitación máxima mensual en 24 h para un periodo de retorno de 2 y 10 años obtenidas en el paso anterior se multiplicaron por 1.13, debido a la corrección por el intervalo fijo de observación (Campos, 1998).

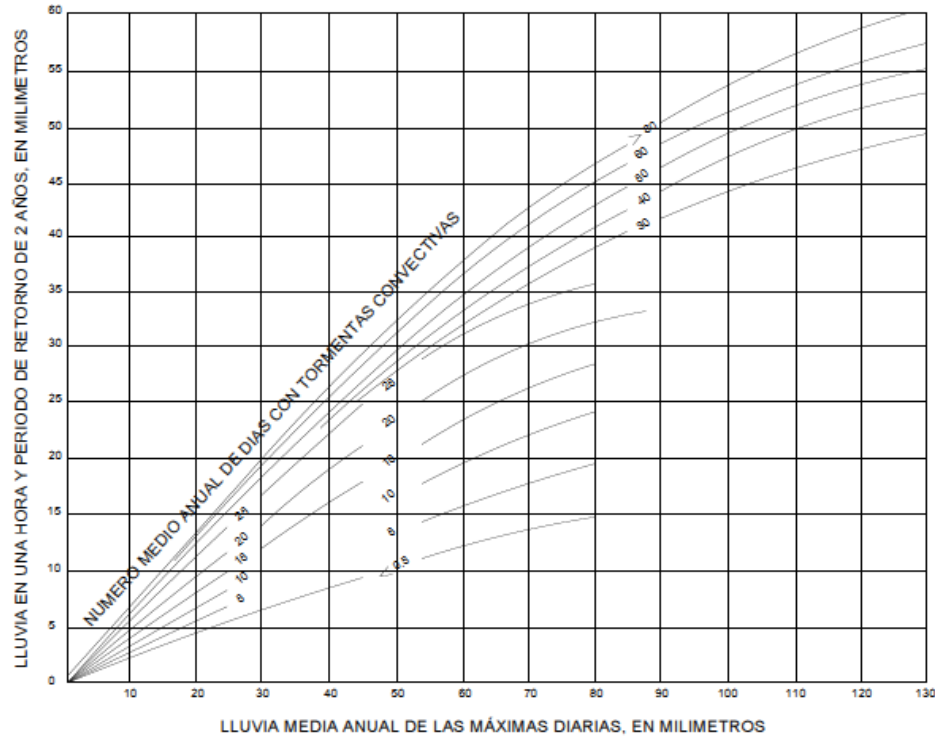
**Cuadro 77.** Lluvia media mensual de las máximas diarias corregidas por el intervalo fijo de observación para un periodo de retorno de dos años ( $P_{24}^2$ ) y 10 años ( $P_{24}^{10}$ ).

T (Años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10	60.74	15.91	5.82	8.66	111.82	116.04	112.08	120.00	188.97	103.17	77.20	53.05
2	11.54	3.00	0.98	0.95	47.32	69.85	66.13	60.41	92.44	54.40	27.90	7.51

### Aplicación del método de Chen

Chen (1983) presentó una fórmula general de intensidad-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas, y periodos de retorno mayores a un año. A continuación se describen los pasos seguidos:

Se determinó la precipitación máxima en un hora y T de 2 años ( $P_1^2$ ) a partir de la Figura 63 utilizando como parámetros de entrada la lluvia media anual de las máximas diarias y el número medio anual de los días con tormentas convectivas (días con lluvias).



**Figura 63.** Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años (Chen citado por Campos 1998).

El número medio anual de días con tormentas convectivas es el número de días con lluvias ( $P > 0$ ), este dato se obtuvo a partir del análisis estadístico de datos de precipitación diaria con el programa pcpSTAT (Liersch, 2003).

Una vez obtenidos los valores mediante la gráfica anterior, se obtuvo el cociente lluvia-duración ( $R$ ), el cual resultó 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 (Ecuación 21) para cada mes:

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad \text{Ecuación (21)}$$

Con el cociente  $R$  y las ecuaciones (Campos, 2007), se calcularon los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  (parámetros de la ecuación de Chen) de manera mensual para cada estación.

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \quad \text{Ecuación (23)}$$



$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \text{ Ecuación (24)}$$

Se estimó la lluvia mensual asociada a un T de 10 años y duración de una hora para cada estación; para ello se multiplicó el valor de R por la precipitación máxima en 24 horas para T de 10 años.

$$P_1^{10} = R * P_{24}^{10} \text{ Ecuación (25)}$$

Se estimaron las precipitaciones mensuales para una duración de 30 minutos y un T de 10 años para cada estación empleando la ecuación de Chen (Ecuación 26).

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{(2-x)T(x-1)})}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60}\right) \text{ Ecuación (26)}$$

Donde:

$P_t^T$  = Intensidad de lluvia para un periodo de retorno de T años y una lluvia de t minutos de duración (mm).

$P_1^{10}$  = Lluvia asociada a un T de 10 años y duración de una hora (mm).

$a, b$  y  $c$  = Parámetros que dependen del lugar.

$X$  = Relación de frecuencia calculada dividiendo  $P_{24}^{100}$  por  $P_{24}^{10}$ .

En el Cuadro 78 se muestran los valores mensuales de precipitación máxima en 30 minutos estimados con el método de Chen para cada estación.

**Cuadro 78.** Precipitación máxima mensual en media hora y periodo de retorno de 10 años para cada estación.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
20010	41.19	10.97	3.79	5.63	76.41	79.42	76.68	81.59	130.32	71.32	52.34	36.01
20026	27.74	26.59	21.68	12.72	28.61	43.68	37.81	48.32	41.35	22.94	13.89	8.33
20038	18.60	19.54	13.34	22.44	45.83	53.39	71.52	66.45	68.58	65.45	29.35	18.61
20044	4.36	21.61	12.25	32.83	34.16	35.10	38.48	30.73	39.95	23.40	14.35	8.93
20077	19.98	15.88	8.30	20.80	46.19	62.10	63.68	67.02	67.45	52.02	33.22	18.30
20110	18.57	9.63	9.98	22.95	38.04	41.95	36.32	36.60	71.39	29.05	32.03	5.93
20115	35.75	20.35	24.76	18.70	36.24	31.74	33.40	51.45	40.07	55.93	20.92	12.67
20121	6.34	9.20	15.40	19.37	27.28	52.08	37.94	31.05	28.71	17.38	21.08	2.23



20126	15.48	27.02	19.31	29.68	58.42	62.11	46.28	69.95	61.78	50.81	26.70	14.08
20143	7.52	21.45	16.40	23.14	42.39	49.40	37.19	98.65	47.14	25.44	16.88	6.82
20144	7.52	21.45	16.26	23.40	41.97	50.26	38.05	50.21	47.12	25.44	16.78	6.61
20146	21.02	16.43	13.27	31.07	37.52	50.59	37.13	52.05	44.62	46.04	13.23	12.51
20153	30.28	36.36	28.22	63.16	94.72	78.23	90.82	69.05	70.93	50.96	40.42	22.04
20259	8.35	17.37	13.38	8.58	32.68	50.20	56.11	51.39	63.29	45.66	22.31	17.09

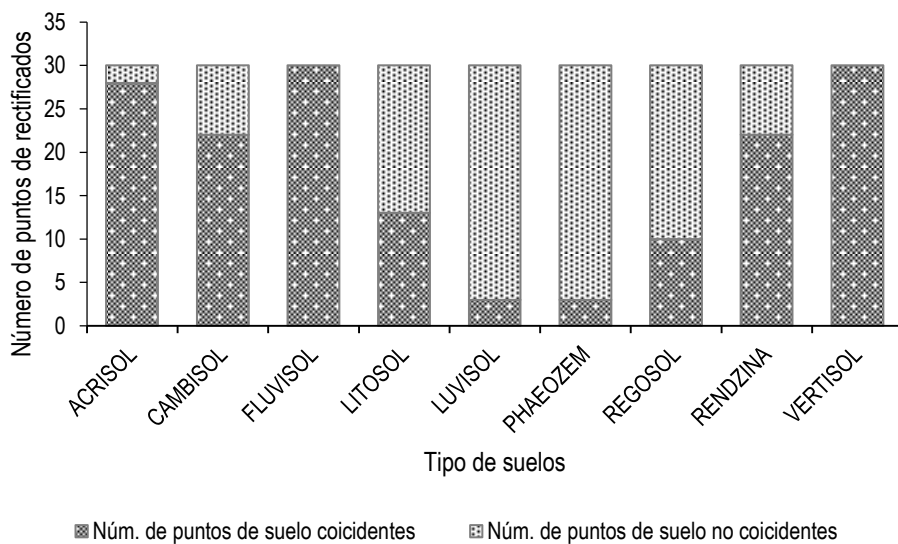
Para validar los datos de intensidad estimados por el método de Chen, se utilizó la intensidad media anual máxima en 30 minutos y se comparó con los datos que reporta la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2012) para un periodo de retorno de 10 años dando un error absoluto medio de 3.7.

### Anexo 8. Verificación de los suelos generados a través de análisis de componentes

Para conocer la precisión con que se generaron los suelos mediante el proceso de análisis de componentes, se verificaron aleatoriamente 30 puntos para cada polígono de suelo que reporta el INEGI (2009).

Su verificación se hizo con imágenes de satélite del área según las características de cada suelo.

Una vez rectificadas los 30 puntos de suelo para cada polígono del INEGI, se hizo un conteo de los puntos de suelo que coincidieron con los polígonos generados con análisis de componentes, obteniendo así para cada grupo suelo el número de puntos que coincidieron con el generado (Figura 64).







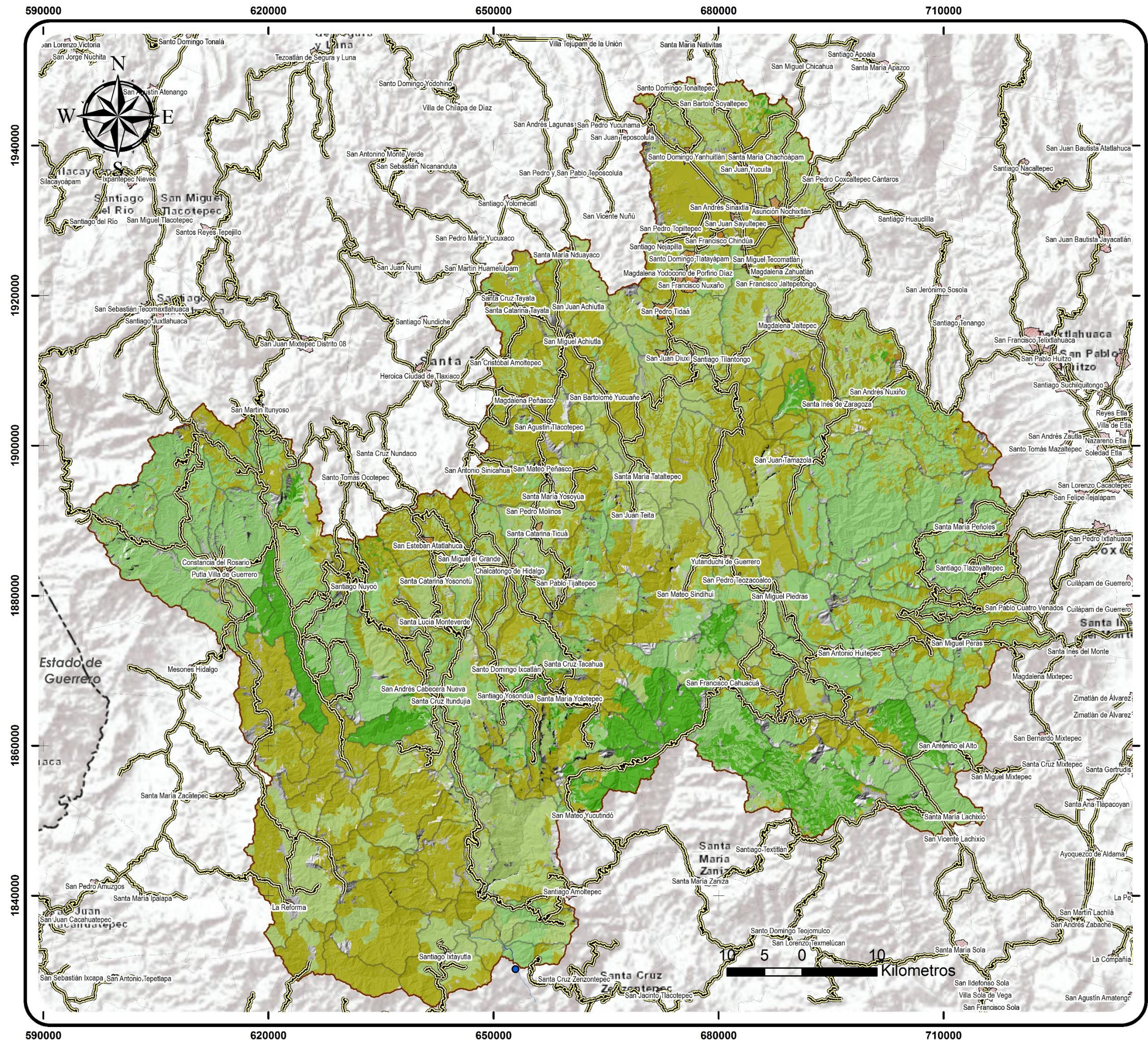
**Figura 64.** Número de puntos de suelo coincidentes a los generados por ACP en cada polígono de suelo.

Donde se pudo observar que los suelos regosol, luvisol y phaeozem fueron los suelos generados con menor precisión.

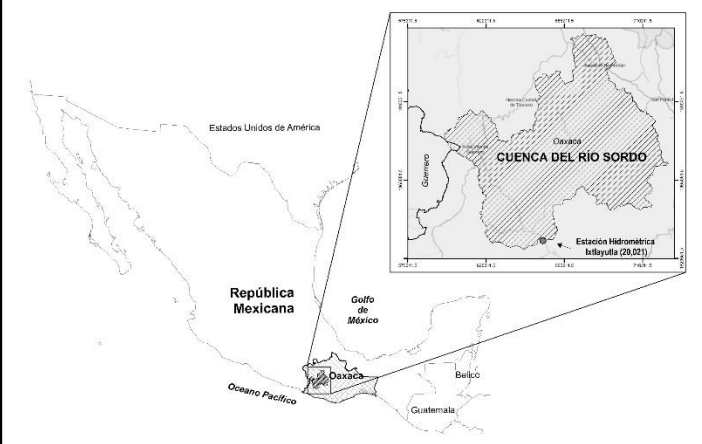
En total se verificaron 270 puntos, de los cuales 161 el método los generó correctamente, resultando una eficiencia general del 60 %.



## **Anexo 9. Planos**



## LOCALIZACIÓN



## SIMBOLOGÍA

- |  |                      |                       |                 |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------|
|  | Parteaguas           |                       | Cuerpos de agua |
|  | Localidades          | <b>Biomasa (T/ha)</b> |                 |
|  | Estac. Hidrométricas |                       | < 5             |
|  | Ríos                 |                       | 5 - 10          |
|  | Carreteras           |                       | 10 - 20         |
|  | Caminos              |                       | 20 - 30         |
|  | Subcuencas           |                       | < 30            |
|  | Límite estatal       |                       |                 |
|  | Límite municipal     |                       |                 |

## CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Área: 7,751 km<sup>2</sup>  
 Perímetro: 825.27 km  
 Orden: 6  
 Precipitación media: 1,229 mm  
 Longitud total de cauces: 2,587.83 km  
 Densidad de drenaje: 0.33 km/km<sup>2</sup>  
 Densidad hidrográfica: 0.11 cauces/km<sup>2</sup>

## INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

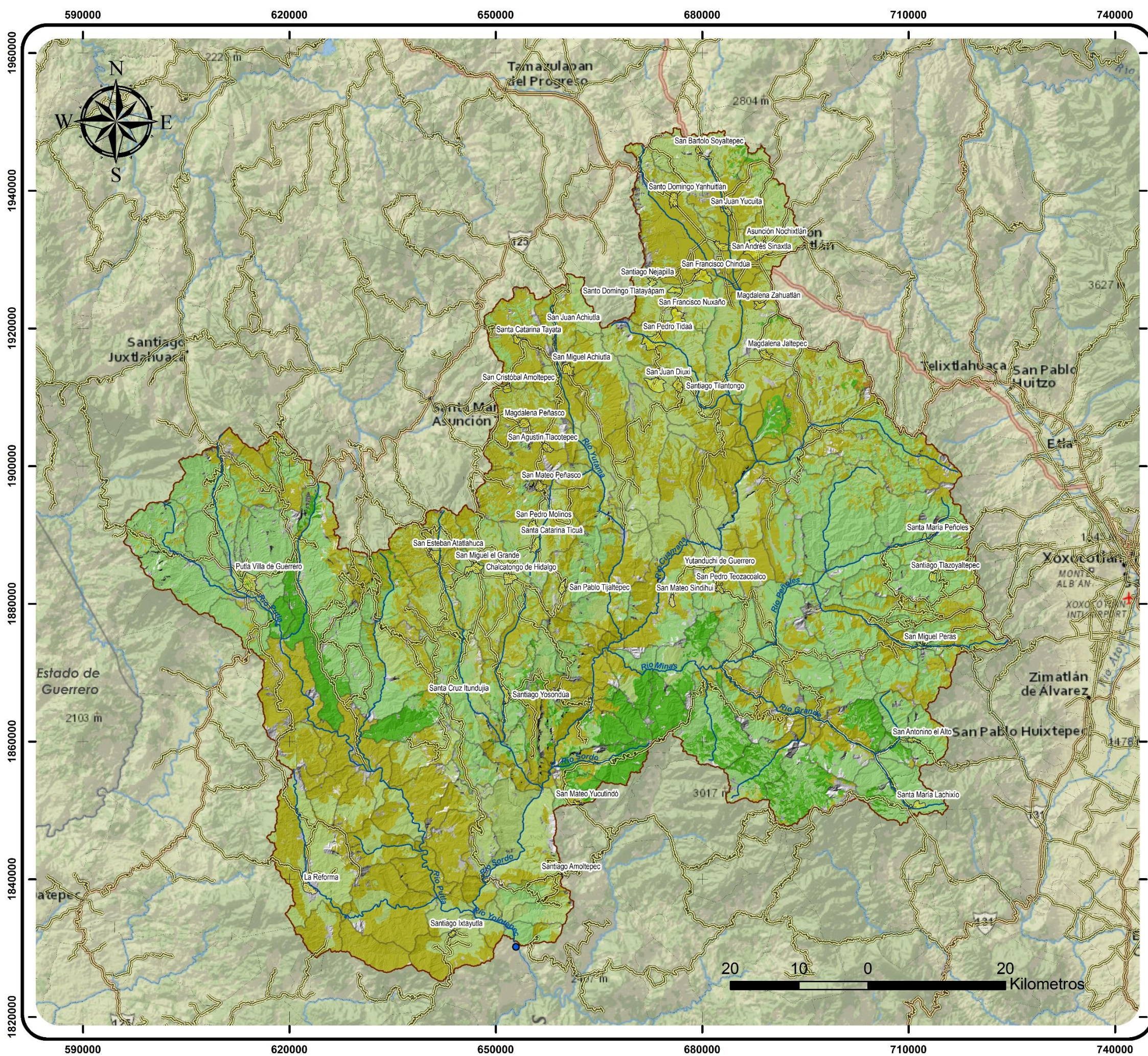
Sistema Coordenado de Proyección: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Meridiano Central: -93.00 Falso Este: 500,000 Falso Norte: 0  
 Unidad lineal: Metros

**Colegio de Postgraduados**  
**Postgrado en Hidrociencias**

Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

## BIOMASA (T/ha)

ELABORÓ:	REVISÓ:
Madaí Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: 1:500,000	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
PLANO 1 DE 1	



### SIMBOLOGÍA

Partaguas	Límite municipal
Localidades	Cuerpos de agua
Estac. Hidrométricas	
Ríos	<b>Biomasa (T/ha)</b>
Carreteras	< 5
Caminos	5 - 10
Subcuencas	10 - 20
Límite estatal	20 - 30
	< 30

### CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

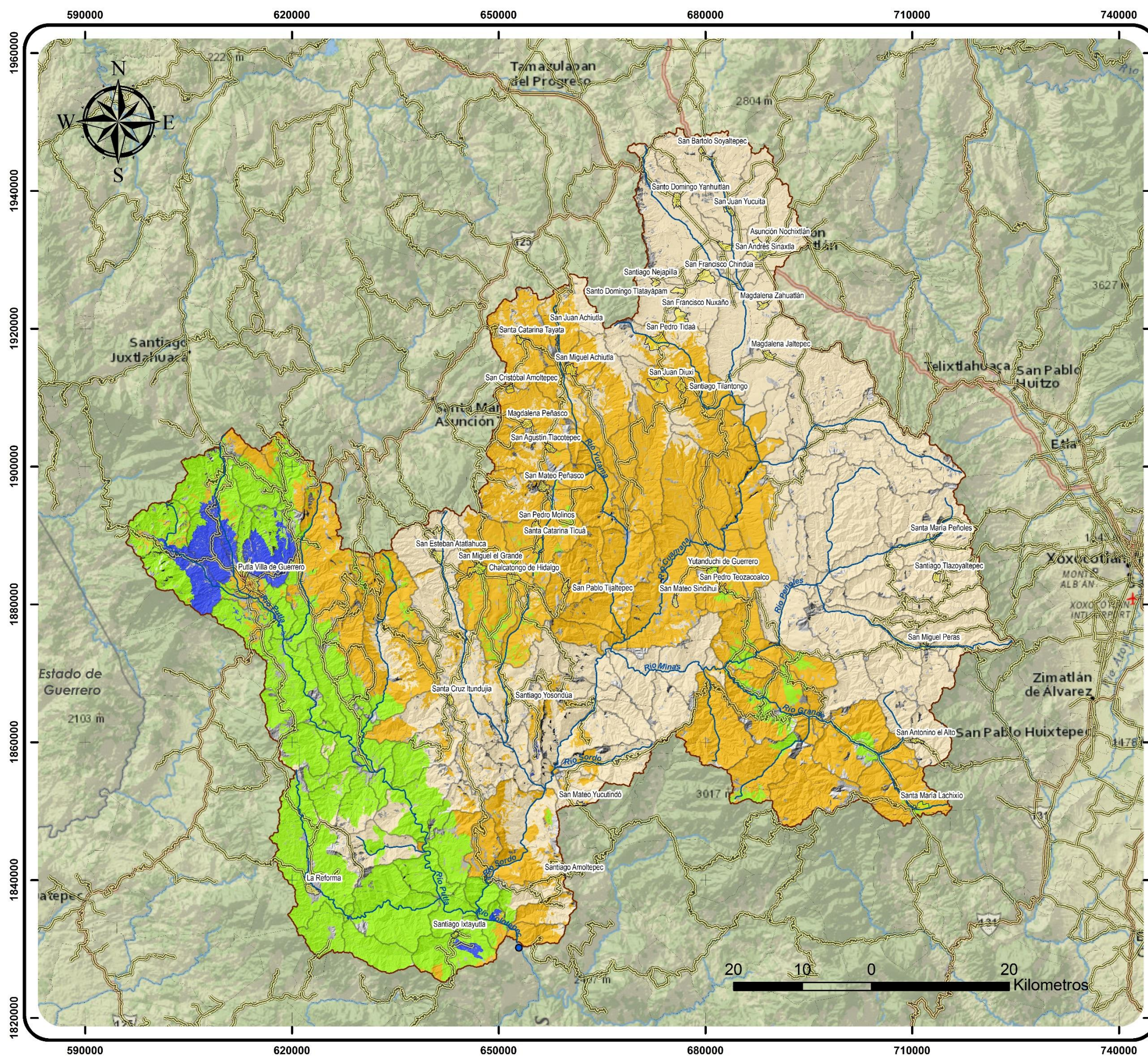
Área: 7,751 km<sup>2</sup>  
 Perímetro: 825.27 km  
 Orden: 6  
 Precipitación media: 1,229 mm  
 Longitud total de cauces: 2,587.83 km  
 Densidad de drenaje: 0.33 km/km<sup>2</sup>  
 Densidad hidrográfica: 0.11 cauces/km<sup>2</sup>

### INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Sistema Coordinado de Proyección: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Meridiano Central: -93.00 Falso Este: 500,000 Falso Norte: 0  
 Unidad linear: Metros

Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca

BIOMASA (T/ha)	
ELABORÓ:	REVISÓ:
Madaí Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: 1:550,000	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
	PLANO 1 DE 1



### SIMBOLOGÍA

	Parteaguas		Cuerpos de agua
	Localidades	<b>CE</b>	
	Estac. Hidrométricas		<math>< 0.05</math>
	Ríos		0.05 - 0.1
	Carreteras		0.1 - 0.2
	Caminos		0.2 - 0.3
	Subcuencas		> 0.3
	Límite estatal		
	Límite municipal		

### CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Área: 7,751 km<sup>2</sup>  
 Perímetro: 825.27 km  
 Orden: 6  
 Precipitación media: 1,229 mm  
 Longitud total de cauces: 2,587.83 km  
 Densidad de drenaje: 0.33 km/km<sup>2</sup>  
 Densidad hidrográfica: 0.11 cauces/km<sup>2</sup>

### INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

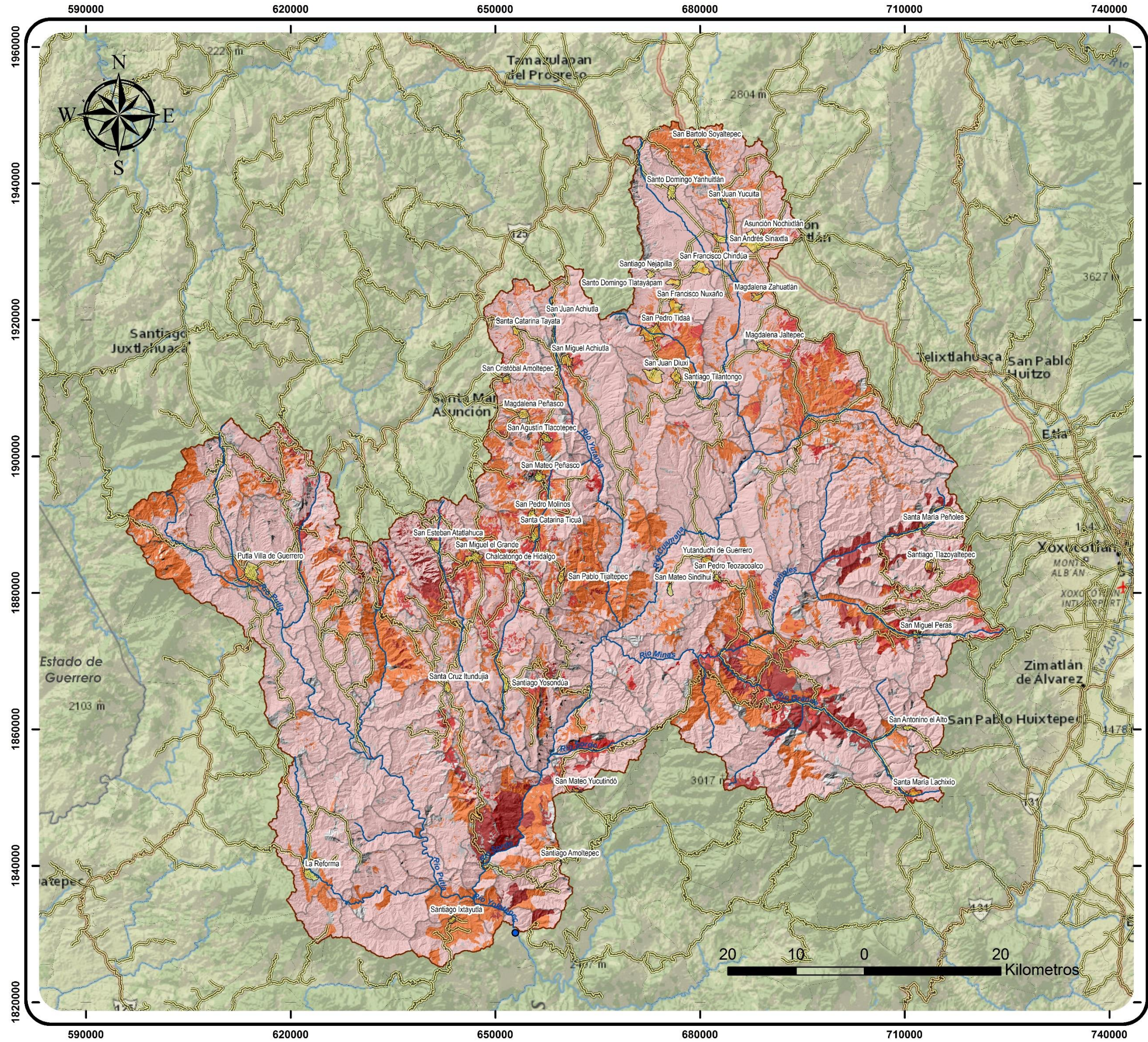
Sistema Coordinado de Proyección: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Meridiano Central: -93.00 Falso Este: 500,000 Falso Norte: 0  
 Unidad linear: Metros

**Colegio de Postgraduados**  
**Postgrado en Hidrociencias**

Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca

### COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO

ELABORÓ:	REVISÓ:
_____	_____
Madaí Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: 1:550,000	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
	PLANO 1 DE 1



### SIMBOLOGÍA

	Parteaguas		Cuerpos de agua
	Localidades	<b>Erosión (T/ha)</b>	
	Estac. Hidrométricas		Ligera (0 - 10)
	Ríos		Moderada (10 - 50)
	Carreteras		Alta (50 - 200)
	Caminos		Muy alta (>200)
	Subcuencas		
	Límite estatal		
	Límite municipal		

### CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Área: 7,751 km<sup>2</sup>  
 Perímetro: 825.27 km  
 Orden: 6  
 Precipitación media: 1,229 mm  
 Longitud total de cauces: 2,587.83 km  
 Densidad de drenaje: 0.33 km/km<sup>2</sup>  
 Densidad hidrográfica: 0.11 cauces/km<sup>2</sup>

### INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

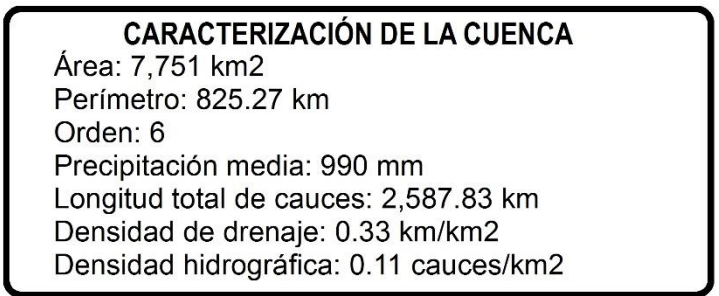
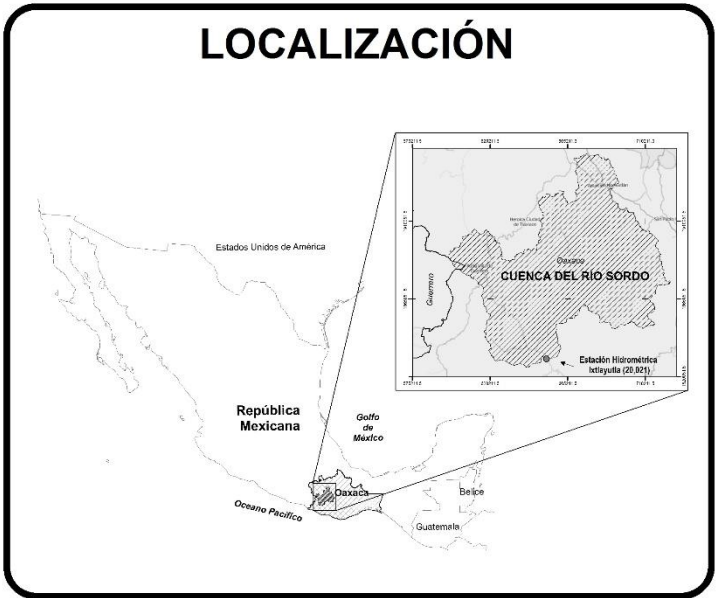
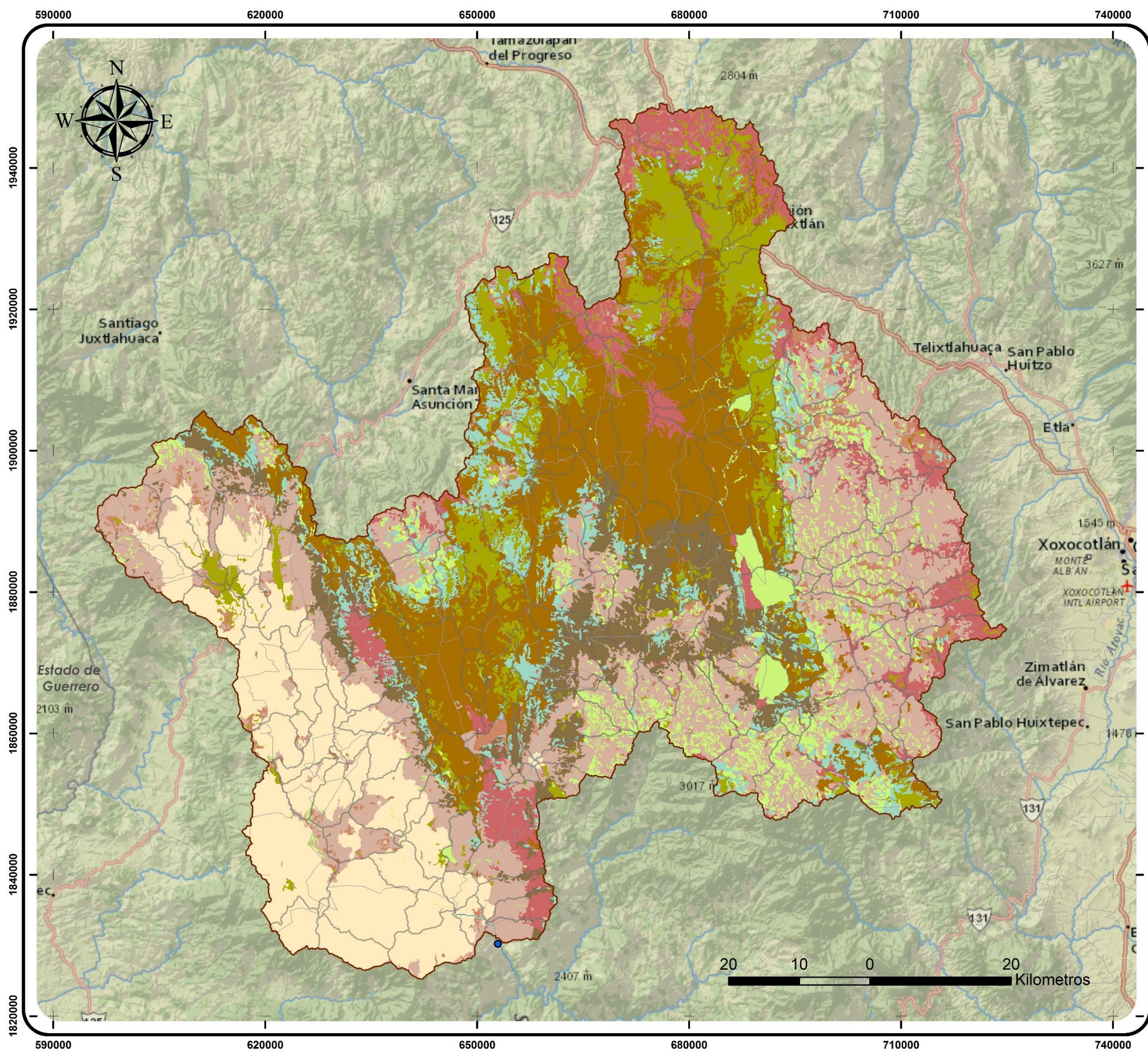
Sistema Coordinado de Proyección: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Meridiano Central: -93.00 Falso Este: 500,000 Falso Norte: 0  
 Unidad lineal: Metros

**Colegio de Postgraduados**  
**Postgrado en Hidrociencias**

Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca

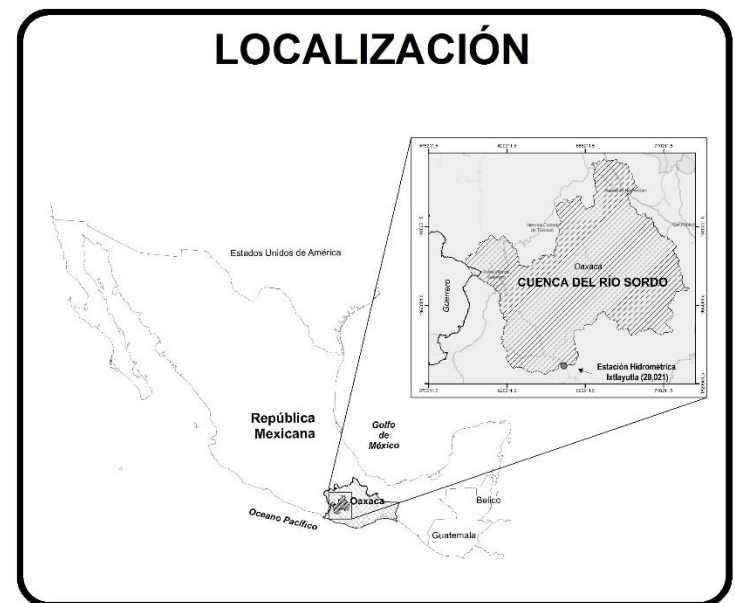
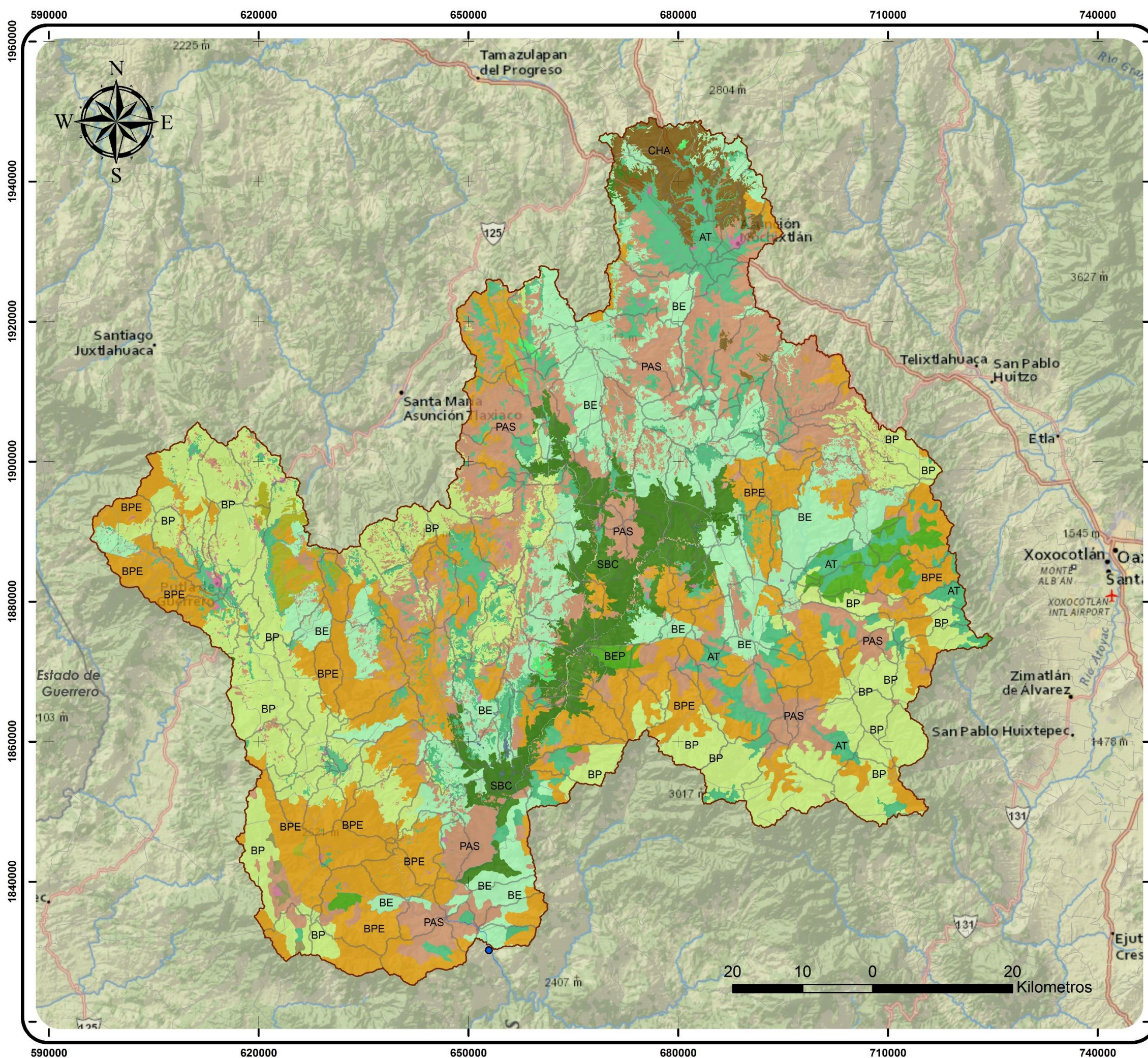
### EROSIÓN (T/ha)

ELABORÓ:	REVISÓ:
Madai Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: 1:550,000	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
PLANO 1 DE 1	



Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca

SUELOS	
ELABORÓ:	REVISÓ:
_____	_____
Madaí Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: La indicada	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
	PLANO 1 DE 1



### SIMBOLOGÍA

Parteaguas	(AR) Agricultura de riego
Poblaciones	(AT) Agricultura de temporal
Estac. Hidrométricas	(BE) Bosque de encino
Ríos	(BEP) Bosque de encino-pino
Carreteras	(BMM) Bosque mesófilo de montaña
Subcuencas	(BP) Bosque de pino
Limite estatal	(BPE) Bosque de pino-encino
Limite municipal	(BT) Bosque de tascáte
Cuerpos de agua	(CA) Cuerpos de agua
	(CHA) Chaparral
	(PAS) Pastizal
	(SBC) Selva baja caducifolia
	(SSC) Suelo sin cobertura
	(ZU) Zona urbana

### CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Área: 7,751 km<sup>2</sup>  
 Perímetro: 825.27 km  
 Orden: 6  
 Precipitación media: 990 mm  
 Longitud total de cauces: 2,587.83 km  
 Densidad de drenaje: 0.33 km/km<sup>2</sup>  
 Densidad hidrográfica: 0.11 cauces/km<sup>2</sup>

### INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Sistema Coordinado de Proyección: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Meridiano Central: -93.00 Falso Este: 500,000 Falso Norte: 0  
 Unidad lineal: Metros

**Colegio de Postgraduados**  
**Postgrado en Hidrociencias**

Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo, Oaxaca

### USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

ELABORÓ:	REVISÓ:
Madai Sánchez Galindo	Dr. Demetrio Fernández Reynoso
ESCALA: La indicada	MONTECILLOS, MEX., JUNIO DE 2015
PLANO 1 DE 1	