



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

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

**APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN
DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE MÉXICO**

TESIS

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

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

PRESENTA:

FRANCISCO RIVERA TORAL

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, MAYO DE 2010

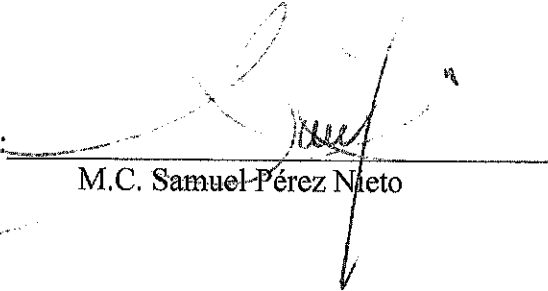


**APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
EROSIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE MÉXICO**

Tesis realizada por Francisco Rivera Toral bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

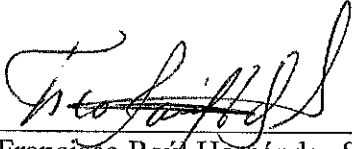
DIRECTOR:


M.C. Samuel Pérez Nieto

ASESOR:


Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR:


M.C. Francisco Raúl Hernández Saucedo

DEDICATORIAS

Con la terminación de esta tesis, concluye una etapa muy importante de mi vida, y por ello quiero dedicarla con todo mi amor y respeto a mis padres Adela y Francisco por todas sus enseñanzas y humildad que tanto me han servido y han sido mi aliento durante toda esta etapa de estudiante, infinitamente gracias.

A mis hermanos del Alma Bernardo y Benigno que siempre me han apoyado y por el gran afecto y comprensión.

A Mónica por su compañía y cuyo apoyo ha sido fundamental en la elaboración y conclusión de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente a quienes han colaborado directa e indirectamente en este trabajo.

Primeramente a mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Chapingo, que fue mi segunda casa durante estos nueve largos, pero gloriosos años, donde realice mi más preciado sueño, así mismo al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por darme un lugar en sus aulas el cual fue posible también gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Al comité asesor constituido por la Dra. Laura A. Ibáñez Castillo, el M.C. Samuel Pérez Nieto y el M.C. Raúl Hernández Saucedo; y al coordinador del posgrado, el Dr. Ramón Arteaga Ramírez y al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, quienes han sido grandes maestros, profesores, pero sobre todo amigos.

Al Organismo de Cuenca Aguas Valle de México de la Comisión Nacional del Agua, que brindaron amablemente las imágenes de satélite.

Al personal de la Unidad de Servicios Profesionales y Transferencia de Tecnología en Ingeniería Agrícola (USPROTTIA)

DATOS BIGRÁFICOS

El autor de la presenta tesis es originario del municipio de Xochitlán de Vicente Suárez, Puebla, nació el 04 de julio de 1984, la educación básica la realizó en el mismo municipio, la educación media y superior la realizó en la Universidad Autónoma Chapingo egresando en 2007 del Departamento de Irrigación y obtuvo el título de licenciatura en “Ingeniero en Irrigación” el 13 de agosto de ese mismo año bajo el tema de tesis *“Cambio del uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Coatlán, Chiapas”*. En agosto de 2007 ingresó al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua para realizar estudios de Maestría. De junio de 2008 a diciembre de 2009 fue colaborador técnico en la realización de los siguientes proyectos elaborados por la Universidad Autónoma Chapingo para la Comisión Nacional del Agua: *“Caracterización y diagnóstico de la cuenca Ixtapan del Oro, Estado México”*, *“Caracterización y diagnóstico de la cuenca del río Tula, Hidalgo”*, *Estudio de factibilidad de la rehabilitación y/o ampliación de la capacidad de almacenamiento de la presa El Durazno, en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, presa Adolfo López Mateos y presa Santiago Tetlapayac, en el municipio de Almoloya, del estado de Hidalgo”*.

APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE MÉXICO

Francisco Rivera Toral¹
Samuel Pérez Nieto²

RESUMEN

Se revisó la aplicabilidad del modelo de simulación hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), en las cuencas de México, aplicándolo a la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, para la estimación de pérdida de suelo; comparando los resultados con los valores estimados mediante la técnica del álgebra de mapas; se encontró que SWAT subestima el factor topográfico en las subcuencas cuando la pendiente es mayor del 25%, ya que realiza una mala estimación de la longitud de la pendiente, asignándole un valor constante de 0.05 m, valor que puede ser corregido si se estima de forma externa al modelo y se introduce manualmente.

Con estas consideraciones, se puede usar el modelo SWAT para la estimación de pérdida de suelo en cuencas hidrográficas, ampliando su utilización en México que hasta hora se ha restringido a la realización de balances hidrológicos.

Para la cuenca en estudio, se estimó que el 88.7% de la superficie (13,138.8 ha), se encuentra en las clases de erosión incipiente y ligera, lo que refleja el buen estado de conservación de su vegetación y de sus suelos, estando el 75.4% de su superficie (11,150.7 ha) cubierta por bosque.

Palabras clave: SWAT, erosión, factor topográfico, Ixtapan del Oro.

APPLICABILITY OF SWAT MODEL FOR THE ESTIMATION OF WATER EROSION IN THE WATERSHEDS OF MEXICO

Francisco Rivera Toral¹
Samuel Pérez Nieto²

ABSTRACT

The applicability of the hydrologic simulation model known as SWAT (Soil and Water Assessment Tool), in the watersheds of Mexico, was examined by applying it to the Ixtapan del Oro watershed in the State of Mexico for the estimation of soil loss; comparing the results with the values estimated by the algebra of maps techniques, it was found that SWAT underestimates the topographic factor in the sub-watersheds when slopes are greater than 25%, due to an incorrect estimation of the slope's longitude, assigning it a constant value of 0.05 m, a value that can be corrected if it is estimated externally to the model and introduced manually.

With these considerations, SWAT can be used for the estimation of soil loss in the hydrographic watersheds, extending its use in Mexico that to date has only been used for the carrying out of hydrologic balances.

For the watershed studied, it was estimated that 88.7% of the surface (13,138.8 ha) lies within the erosion classes deemed to be incipient and slight, which reflects the good state of conservation of its vegetation and soil, with 75.4% of its surface (11,150.7 ha) being covered by forest.

Key words: SWAT, erosion, topographic factor, Ixtapan del Oro.

¹ Tesista

² Director

¹ Author

² Thesis adviser

CONTENIDO

Pág.

ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GENERAL	4
2.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO	5
3.1.1. El problema de la erosión.....	5
3.1.2. Tolerancia de pérdida de suelo.....	9
3.1.3. Modelos empleados para determinar erosión hídrica	10
3.2. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS CON LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO MODIFICADA (EUPSM).....	13
3.2.1. Volumen de escurrimiento superficial	14
3.2.2. Método de las curvas numéricas	16
3.2.2.1. Grupo de suelo.....	16
3.2.2.2. Condición hidrológica del área de drenaje	17
3.2.2.3. Uso del suelo	17
3.2.2.4. Condición de humedad antecedente	20
3.2.2.5. Ajustes por pendiente	21
3.2.3. Gasto pico de escurrimiento.....	22
3.2.4. Factor de erosividad de la lluvia	24
3.2.5. Factor de erosionabilidad del suelo.....	26
3.2.6. Factor de cobertura y manejo.....	30
3.2.7. Factor de prácticas de conservación.....	31
3.2.8. Factor topográfico	35
3.2.9. Factor de fragmento grueso.....	38

3.3.	EL MODELO SWAT.....	38
3.4.	SENSORES REMOTOS.....	42
3.5.	TRABAJOS ANTECEDENTES.....	46
3.5.1.	Sobre el factor topográfico <i>LS</i>	47
3.5.2.	Sobre la aplicación del modelo SWAT.....	48
3.5.3.	Sobre la erosión.....	50
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	55
4.1.1.	Ubicación geográfica	55
4.1.2.	División política.....	56
4.1.3.	Fisiografía	58
4.1.4.	Hidrografía	60
4.1.5.	Suelos y vegetación.....	61
4.1.6.	Clima.....	64
4.2.	MATERIALES UTILIZADOS.....	66
4.2.1.	Material cartográfico.....	66
4.2.2.	Modelo digital de elevaciones.....	66
4.2.3.	Programas de cómputo.....	67
4.2.4.	Bases de datos	68
4.2.5.	Imágenes de satélite	68
4.3.	MÉTODOS.....	69
4.3.1.	Estaciones climatológicas	69
4.3.2.	Información del suelo.....	70
4.3.3.	Procesamiento de las imágenes de satélite.....	72
4.3.4.	Clases de uso del suelo.....	73
4.3.5.	Delimitación de la cuenca y alimentación del modelo SWAT	74
4.3.6.	Obtención de los principales parámetros físicos de la cuenca	78
4.3.7.	Estimación de la erosión mediante álgebra de mapas.....	78
4.3.8.	Estimación de la erosión con SWAT y corrección del factor topográfico <i>LS</i>	80

4.3.9.	Análisis estadístico.....	82
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	85
5.1.	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA.....	85
5.2.	PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA.....	88
5.3.	EROSIÓN CON ÁLGEBRA DE MAPAS	90
5.4.	EROSIÓN CON SWAT.....	92
5.5.	COMPARACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO.....	94
5.6.	CORRECCIÓN DE LA LONGITUD DE LA PENDIENTE	97
5.7.	ESCURRIMIENTOS DE LA CUENCA	103
6.	CONCLUSIONES	106
7.	RECOMENDACIONES	108
7.1.	SOBRE LA APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT.....	108
7.2.	SOBRE LA CUENCA ESTUDIADA	109
8.	LITERATURA CITADA.....	110
9.	ANEXOS	114
9.1.	ANEXO 1: PLANOS	115
9.2.	ANEXOS 2: UNIDADES DE RESPUESTA HIDOLÓGICA	127

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 3.1 Pérdidas de suelo permisibles.....	10
Cuadro 3.2. Grupo de suelo hidrológico	16
Cuadro 3.3. Condiciones hidrológicas	17
Cuadro 3.4. Valores del NC para uso urbano del suelo	18
Cuadro 3.5. Valores del NC para uso agrícola del suelo	19
Cuadro 3.6. Ecuaciones que estiman el factor R (EI_{30}).....	26
Cuadro 3.7. Códigos de estructura para definir el valor de K	27
Cuadro 3.8. Códigos de permeabilidad del suelo para definir el valor de K	27
Cuadro 3.9. Valores del factor de erosionabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial.....	29
Cuadro 3.10. Valores del factor de erosionabilidad (K) en función de la textura y contenido de materia orgánica	30
Cuadro 3.11. Valores de C para pastizales, matorral y arbustos.....	32
Cuadro 3.12. Factor C para bosques	32
Cuadro 3.13. Valores de C para cultivos.....	33
Cuadro 3.14. Valores de factor P para surcado al contorno, fajas al contorno y terraceo.....	34
Cuadro 3.15. Valores del factor P para diferentes prácticas de conservación	35
Cuadro 3.16. Características de los sensores del satélite SPOT 5	46
Cuadro 4.1 Distribución de la superficie en la cuenca Ixtapan por municipio	57
Cuadro 4.2. Precipitación media anual en las estaciones.....	65
Cuadro 4.3. Imágenes del satélite Spot 5 empleadas	68
Cuadro 4.4. Estaciones meteorológicas consideradas.....	69
Cuadro 4.5. Grupos de suelo de la cuenca	71
Cuadro 4.6. Clases de uso del suelo.....	74

	Pág.
Cuadro 5.1. Principales parámetros de las subcuencas	86
Cuadro 5.2. Cauces principales definidos en SWAT para las 35 subcuencas generadas	87
Cuadro 5.3. Parámetros físicos de la cuenca.....	88
Cuadro 5.4. Erosión hídrica en la cuenca de acuerdo a la clasificación FAO y superficies afectadas	91
Cuadro 5.5. Erosión hídrica actual distribuida en los cuatro principales municipios de la cuenca.....	91
Cuadro 5.6. Erosión con SWAT por subcuencas.....	93
Cuadro 5.7. Valores de <i>LS</i> del álgebra de mapas y del SWAT.....	95
Cuadro 5.8. Valores de la longitud de la pendiente corregidos y sus variables que lo definen	99
Cuadro 5.9. Valores de erosión estimados mediante el SWAT, con valores corregidos de la longitud de pendiente	100
Cuadro 5.10. Resultados del balance hidrológico por subcuenca obtenido del SWAT	104
Cuadro 5.11. Caudales y sedimentos producidos en las subcuencas	105
Cuadro 9.1. Sedimentos y balance de cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH).....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 3.1. Etapas de la erosión en el suelo causada por la precipitación	6
Figura 3.2. Factores que intervienen en la erosión hídrica y sus interrelaciones.....	7
Figura 3.3. Factores que condicionan la erosionabilidad del suelo.....	12
Figura 3.4. Regionalización de la República mexicana para estimar la erosividad de la lluvia	25
Figura 3.5. Nomograma para evaluar el factor <i>K</i> de erosionabilidad del suelo	27
Figura 3.6. Menú principal del modelo SWAT como su interface de ArcView.....	41
Figura 3.7. Fuentes de energía empleados por los sensores remotos.....	43
Figura 3.8. Pasos fundamentales del proceso de imágenes de satélite.....	45
Figura 4.1. Localización de la cuenca Ixtapan del Oro, en la República Mexicana	55
Figura 4.2. Ubicación de la cuenca Ixtapan del Oro en las principales subcuencas de la Región Hidrológica	56
Figura 4.3. Municipios de la cuenca Ixtapan del Oro	57
Figura 4.4. Principales cerros de la cuenca.	60
Figura 4.5. Tipos de suelo en la cuenca	62
Figura 4.6. Comportamiento de la precipitación, evaporación y temperatura	66
Figura 4.7. Modelo digital de elevaciones	67
Figura 4.8. Puntos de muestreo en la cuenca	70
Figura 4.9. Muestreo de los suelos de la cuenca	71
Figura 4.10. Mosaico de las imágenes y definición de áreas de entrenamiento	73
Figura 4.11. Activación de los usos y tipos de suelo	75
Figura 4.12. Definición de las unidades de respuesta hidrológica.....	76
Figura 4.13. Activación de los archivos que contiene la información climatológica	76
Figura 4.14. Corrida del modelo SWAT.....	77
Figura 4.15. Estimación de los parámetros físicos de la cuenca en la extensión Water Cycle del Idrisi	78
Figura 4.16. Esquema que muestra la aplicación del álgebra de mapas para el cálculo de la pérdida de suelo en la cuenca aplicando la EUPS	79
Figura 4.17. Modificación de la longitud de la pendiente.....	81
Figura 4.18. Tabla de atributos del archivo subbasins	82

Figura 5.1. Perfil del cauce principal	89
Figura 5.2. Curva hipsométrica de la cuenca	90
Figura 5.3. Erosión hídrica en los municipios de la cuenca.....	92
Figura 5.4. Comparación de la erosión por subcuenca	94
Figura 5.5. Valores del factor topográfico	97

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se evalúa la erosión usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), el mayor inconveniente se presenta en el cálculo del factor topográfico (LS), lo cual se debe a su concepto original basado en lotes experimentales uniformes en pendiente y longitud de flujo superficial. Cuando se extiende la EUPS a cuencas, la mayor dificultad es estimar la longitud de la pendiente que se debe utilizar en las ecuaciones de LS .

En el presente trabajo se estimó la erosión hídrica mediante el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), el cual es un programa de modelación hidrológica creado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA), que realiza balances hidrológicos y estimación de pérdida de suelo.

El SWAT fue aplicado en cuencas costeras del estado de Chiapas, México por CONAGUA (2006) para estimar la erosión hídrica y producción de sedimentos causada por el huracán Stán en 2005, y arrojó valores de erosión bajos, comparados con la erosión estimada mediante la técnica del álgebra de mapas, por lo que se pensó que no estaba creado para aplicarse en cuencas con características físicas como las de México y, que estaba realizando una subestimación del factor LS , dado que se trataba de cuencas con un alto grado de pendiente.

La cuenca Ixtapan del Oro, posee características físicas representativas de las cuencas de México, como lo son las fuertes pendientes. La CONAGUA en (2008) desarrolló el trabajo “Caracterización y diagnóstico de la microcuenca Ixtapan del Oro, Estado de México”, el cual fue de gran ayuda para el desarrollo de esta investigación, ya que se aprovechó las imágenes de satélite, los recorridos de campo para la identificación de la cuenca y la interpretación de las imágenes, el estudios de suelo, además de la identificación de zonas con fuertes pendientes; esta cuenca es importante, por encontrarse inmersa dentro del área de captación del agua que abastece a la zona metropolitana de la ciudad de México a través del sistema Cutzamala.

Por tal motivo la investigación se desarrolló en la cuenca Ixtapan del Oro, que se ubica al oeste del estado de México colindando con el estado de Michoacán; entre las coordenadas $19^{\circ} 14' 26.8''$ y $19^{\circ} 24' 15.8''$ de latitud norte, y entre los $100^{\circ} 10' 51.4''$ y $100^{\circ} 19' 20.9''$ de longitud. El seleccionar esta cuenca, permitió disminuir los costos para la realización de la investigación.

El trabajo consistió en una comparación de la erosión hídrica estimada con el modelo SWAT y la EUPS mediante la técnica del álgebra de mapas. Se indagó el motivo por el cual SWAT realiza una subestimación de la erosión, y se revisó su aplicabilidad a las cuencas de México, poniendo principal interés en el factor *LS* y dejando claro las limitaciones que puede tener, además se propuso una alternativa de solución a dicha limitación.

Al realizar la estimación de la erosión hídrica, se determinó el grado de conservación de la vegetación y suelo, por lo que se identificaron las zonas con problemas de degradación del suelo, y que requieren ser atendidos, ya que las cuencas hidrográficas son unidades de drenaje en las cuales se lleva a cabo la planeación de los recursos naturales, con la finalidad de obtener bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales, etc., la cuenca a su vez, es un sistema productor de agua y sedimentos, la calidad, cantidad y distribución de éstos depende de los sistemas de producción agrícola y de las condiciones vegetativas de la parte alta de la cuenca.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Revisar la aplicabilidad del módulo de erosión del Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en las cuencas de México.

2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Encontrar la razón por la cual los valores de erosión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) del SWAT son menores a los valores calculados con álgebra de mapas
- Analizar cómo calcula SWAT cada uno de los factores de la EUPS
- Proponer una alternativa de solución a la limitación de aplicabilidad del SWAT en el cálculo de la erosión
- Aplicar la ecuación universal de pérdida de suelo modificada del SWAT para el cálculo de sedimentos en la cuenca Ixtapan del Oro en el Estado de México

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

3.1.1. El problema de la erosión

La erosión es el principal problema edáfico en gran parte de los terrenos agrícolas de México, donde las características de su clima tropical, la baja estabilidad de sus diferentes tipos de suelos y la marginación y pobreza de sus habitantes aceleran la pérdida de suelo (Uribe, *et al.*, 2002).

Vergara y Etchevers (2006), consideran que el manejo del suelo en condiciones de ladera requiere cuidados especiales por los riesgos de erosión y degradación. En esos terrenos el uso de la tierra varía desde bosques primarios a intensivo agrícola y son frecuentes los cambios de uso.

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

El agua es probablemente el agente erosivo más importante. Los escurrimientos arrastran las partículas del suelo lejos de su lugar de origen y, las olas erosionan las orillas de los mares y lagos; de hecho, dondequiera que el agua esté en movimiento, erosiona sus contornos (Hudson, 1982).

Derspsch (2004), señala las siguientes etapas de la erosión hídrica y con base en la Figura 3.1. Por el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo (a), sus agregados son desintegrados en partículas minúsculas (b), que tapan los poros formando una selladura superficial (c), provocando el escurrimiento superficial del agua de lluvia, el agua que escurre carga partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos cuando la velocidad de escurrimiento es reducida (d).

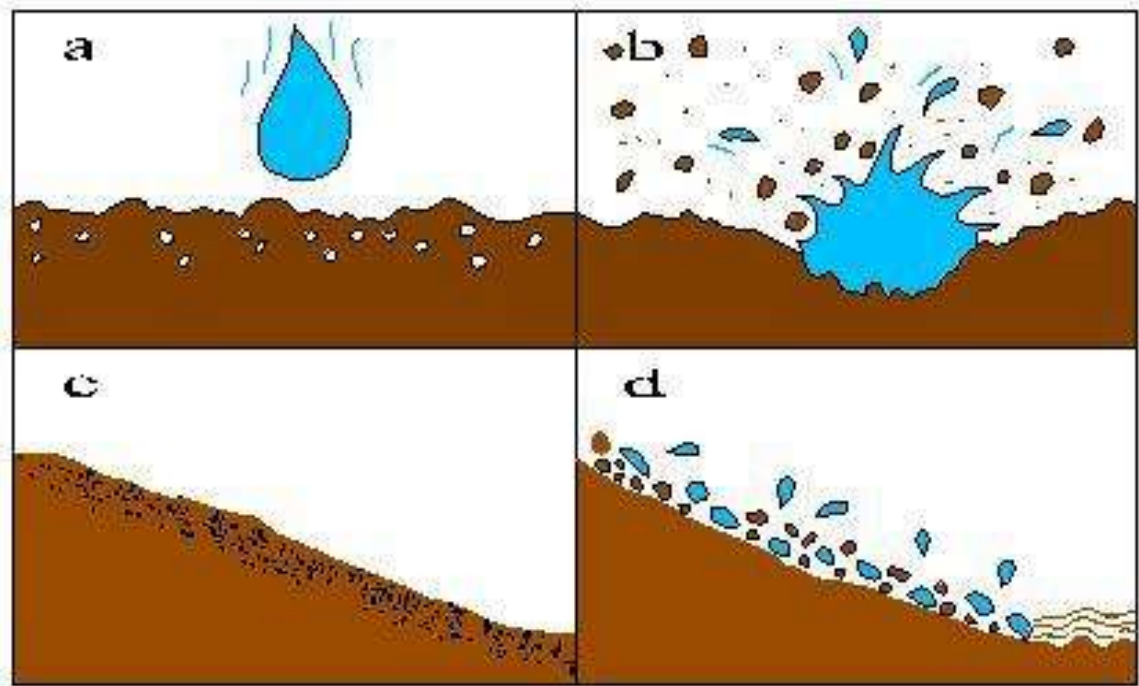


Figura 3.1. Etapas de la erosión en el suelo causada por la precipitación

CONAGUA (2006), expone que los factores que influyen en la tasa de erosión son la lluvia, el escurrimiento, el viento, el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación.

En la Figura 3.2 se muestran los diferentes factores que están involucrados dentro del problema de la erosión, destacando tres en principales grupo: el primero involucra el precipitación y escurrimientos, el segundo las actividades humanas y el ultimo las prácticas de conservación.

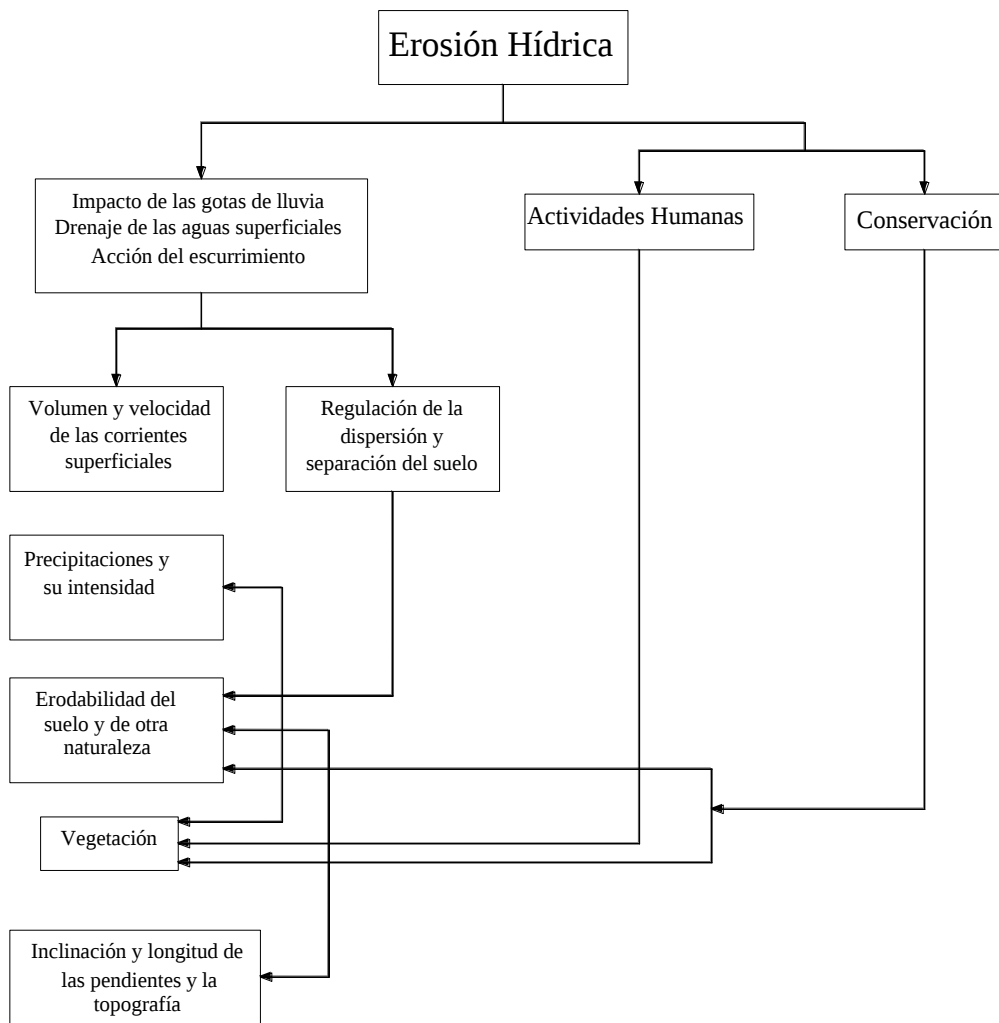


Figura 3.2. Factores que intervienen en la erosión hídrica y sus interrelaciones

González et al., (2007), señala que las causas de la erosión del suelo se pueden englobar en el uso y manejo inapropiado de los agroecosistemas que, en términos generales, comprende la explotación destructiva de los bosques, el sobrepastoreo de los agostaderos y el uso agrícola de suelos con pendientes sin considerar prácticas de conservación de suelo y agua, sin embargo; estas causas tienen su origen en el ámbito social, económico y político, especialmente en las zonas rurales de pequeñas explotaciones, en relación con:

- a) La escasa disponibilidad de tierra, aunado a la presencia de suelos de pobre calidad (delgados, pendientes elevadas), que obliga a trabajar suelos no aptos para el cultivo, con fines de obtener un mínimo de producción para la subsistencia y la alimentación.
- b) La excesiva fragmentación de la tierra y la carencia de recursos socioeconómicos para establecer prácticas de conservación del suelo y agua.
- c) La tenencia comunal de la tierra de pastoreo, que da derecho a su uso pero no obliga a conservarla, con el resultado de un sobrepastoreo de los agostaderos y la consecuente degradación del suelo.
- d) La explotación desmedida del bosque para obtener madera, leña, carbón, postes, etcétera, con fines de uso doméstico y venta para complementar los ingresos.

Las distintas condiciones climáticas y los usos de la tierra que actúan sobre las diversas condiciones naturales moldean al recurso suelo y, en ciertas ocasiones, lo degradan. Los cambios irreversibles generados como consecuencia de las actividades socioeconómicas hacen necesario que se prevea el ordenamiento y la utilización controlada de los recursos naturales disponibles. La intervención planificada sobre el medio debe caminar tanto hacia un crecimiento sostenible como al mantenimiento de un entorno natural digno para el hombre de hoy y las generaciones futuras (Gaspari, *et al.*, 2008).

3.1.2. Tolerancia de pérdida de suelo

La pérdida de suelo permisible está determinada por los diferentes tipos de suelo, así como de sus profundidades; además, de la capacidad de formación de suelo de cada región que se estudie, la cual está en función de las condiciones climatológicas que influyen en el intemperismo.

En el Cuadro 3.1 se reportan algunos valores de pérdida de suelo permisibles en base al tipo de suelo y sus profundidades, en el se muestra que a mayor profundidad del suelo se tiene un valor permisible de pérdida de suelo mayor, y el valor mínimo permisible es para suelos rocosos con profundidades menores de los 25 cm, por su parte cuando los suelos son francos su valor mínimo permisibles es de $6.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El nivel máximo permisible de pérdida de suelo a nivel de la república es de $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Cuadro 3.1 Pérdidas de suelo permisibles

Tipo de suelo	Profundidad del suelo (cm)			Pérdida de suelo permisible (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
Rocoso		>	100	11.2
	50	-	100	9.0
	25	-	50	4.5
		<	25	2.2
Arenoso		>	100	11.2
	50	-	100	9.0
	25	-	50	6.7
		<	25	4.5
Franco	50	-	100	9.0
		<	50	6.7

Fuente: Arellano (1994)

3.1.3. Modelos empleados para determinar erosión hídrica

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo EUPS (o por sus siglas en ingles Universal Soil Loss Equation, USLE), es una relación paramétrica empírica, con la que la pérdida de suelo por unidad de área se calcula como el producto de seis parámetros. Es utilizada para estimar el promedio anual de la erosión laminar y en canalillos de la lluvia en parcelas con pendiente. Generalmente excluye la erosión en cárcavas o en márgenes de los ríos; incluye que el suelo erodado es después depositado si alcanza llegar a las corrientes o almacenamientos de las partes bajas (Arellano, 1994).

La relación paramétrica de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) es:

$$A = R K L S C P \quad (3.1)$$

Donde:

A: Promedio anual de pérdida de suelo (t ha⁻¹)

R: Factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

K: Factor de erosionabilidad del suelo ($\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

L: Factor del grado de longitud (adimensional)

S: Factor del grado de pendiente (adimensional)

C: Factor del manejo de cultivos (adimensional)

P: Factor de prácticas mecánicas (adimensional)

La EUPS estima o predice el promedio anual de erosión como una función de la energía de la lluvia.

La aplicación de la EUPS en el inicio se reducía exclusivamente a zonas agrícolas; sin embargo, con algunas modificaciones, su uso se ha extendido a áreas de pastizales, bosques, o a la producción de sedimentos.

Los sedimentos son partículas sólidas de suelo que se originan por los diferentes tipos de erosión que ocurre en los terrenos de ladera y en los sistemas de drenaje de la zona de aportación. El problema principal que este proceso ocasiona es el desgaste del suelo por el desprendimiento de las partículas y su depositación en las zonas de cultivo y obras hidráulicas, lo que origina que los terrenos de cultivo cambien su condición de fertilidad y los embalses disminuyan su capacidad de almacenamiento (Figuerola, *et al.*, 1991).

Oropeza (2006), elaboró presenta un esquema de los factores que condicionan la erosionabilidad del suelo, mismo que se reproduce en la Figura 3.3

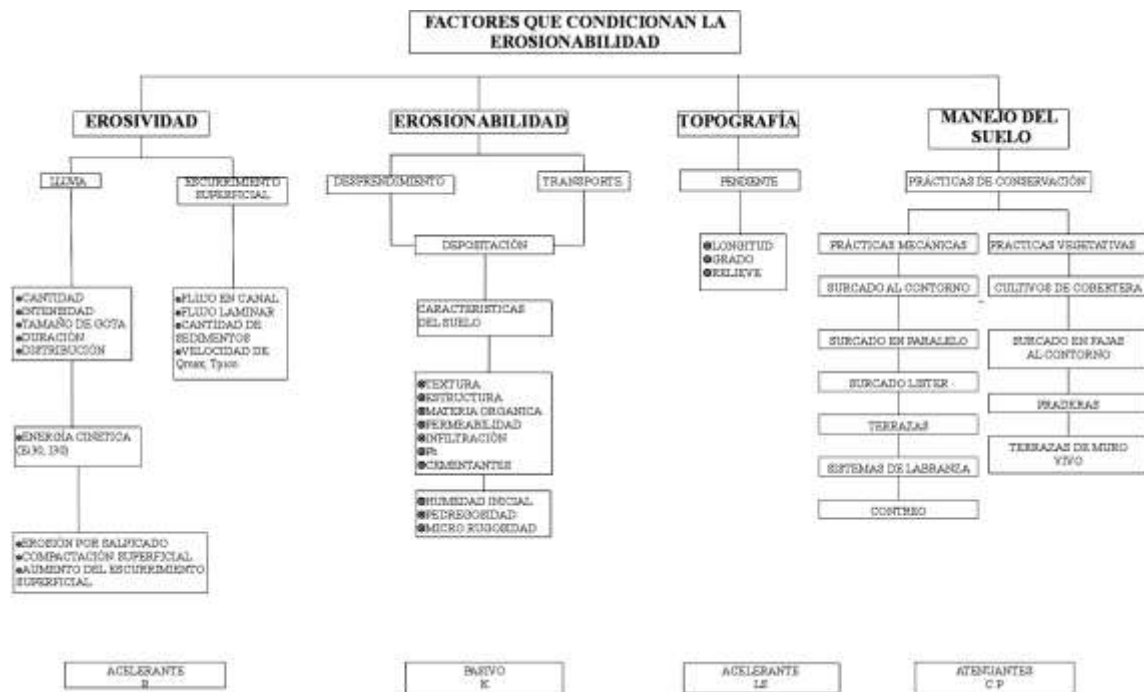


Figura 3.3. Factores que condicionan la erosionabilidad del suelo

Laruse, *et al.* (2004) comentan que los modelos computacionales para predecir la erosión del suelo han recibido una atención creciente en los proyectos de manejo de los recursos suelo y agua. Hasta hace muy poco, la EUPS se usó de manera generalizada como un modelo para la erosión a nivel de campo, pero recientemente se han desarrollado modelos de erosión más sustentados en el proceso, como el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project). Esta nueva tecnología representa el estado del arte cuando se trata de modelar los efectos de los cambios en las características de los suelos asociadas con la erosión.

Por su parte Rodríguez, *et al.* (2004) consideraron que el modelo paramétrico que pretende interpretar los mecanismos erosivos por causas y efectos de la lluvia, de mayor aceptación y más amplia aplicación es la EUPS. La incorporación de los sistemas de

información geográfica (SIG) a este tipo de estudios, permite con técnicas modernas un mejor análisis y representación de la información georeferenciada; sin embargo, Rienzi, *et al.* (1999), hace la observación que la ampliación del ámbito de aplicación de la ecuación puede exceder los límites de confiabilidad de sus parámetros provocando una baja eficiencia de predicción que puede deberse tanto a las características intrínsecas del modelo como a errores de apreciación del operador.

3.2. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS CON LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO MODIFICADA (EUPSM)

La investigación de los años recientes ha generado nuevos modelos de erosión del suelo y producción de sedimentos con diferentes grados de aplicación. Algunos de los modelos se han combinado y computarizado a la par con modelos hidrológicos y de almacenamientos que han generado un paquete computacional completo de hidrología y sedimentología de cuencas.

Para su aplicación a nivel cuenca, Williams y Berndt (1975), citados por Arellano (1994), propusieron una modificación a la EUPS, para considerar el escurrimiento como un factor importante en la habilidad de remoción y transporte de partículas de suelo en la predicción de sedimentos, generando así la EUPSM, que es aplicable a tormentas individuales y permite una adecuada predicción de sedimentos.

Neitsch, *et al.* (2002a), describe que la EUPSM, modificada por Williams en 1995, está dada por la expresión (3.2), en la que Sp es la cantidad de sedimentos producidos en un día (en t); Qs es la cantidad de escurrimiento superficial (en mm ha⁻¹); q_p es el gasto de escurrimiento pico (en m³ s⁻¹); Ac es el área de la cuenca, de la Unidad Hidrológica de Respuesta o la empleada para la estimación (en ha); K es el factor de erosionabilidad del suelo (0.013 t·m²·h m⁻³·t⁻¹·cm⁻¹); C es el factor de cobertura y manejo (adimensional); P es el factor de prácticas de conservación (adimensional); LS es el factor topográfico (adimensional) y FG es el factor de fragmento grueso o de fragmentación de los sedimentos (adimensional).

$$Sp = 11.8(Qs \times q_p \times Ac)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times FG \quad (3.2)$$

Las variables que intervienen en la EUPSM se describen detalladamente enseguida.

3.2.1. Volumen de escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial ocurre cuando la velocidad de aplicación del agua en la superficie del suelo excede la velocidad de infiltración del mismo. Cuando el agua se aplica a un suelo seco, la velocidad de aplicación y la de infiltración pueden ser similares; sin embargo, la velocidad de infiltración decrecerá a medida que el suelo se humedece. Cuando la velocidad de aplicación es mayor que la velocidad de infiltración, las depresiones del suelo se llenan y si esta condición se continúa, empieza el escurrimiento. SWAT, puede utilizar dos métodos para estimar el escurrimiento superficial: el Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos

(SCS) de los Estados Unidos publicado en 1972 y el Método de infiltración de Green y Ampt definido en 1911 (Neitsch, *et al.* 2002a).

La ecuación del SCS es un modelo empírico que fue desarrollado para proveer de bases consistentes para estimar las cantidades de escurrimientos al variar el uso y el tipo de suelo y se define por:

$$Q_s = \frac{(Rd - 0.2Sr)^2}{(Rd - 0.8Sr)} \quad (3.3)$$

Donde:

Q_s : Escurrimiento superficial o exceso de lluvia (en mm)

Rd : Lámina precipitada en el día (en mm)

Sr : Parámetro de retención (en mm) definido por la expresión (3.4)

El parámetro Sr varía espacialmente debido a los cambios en el suelo, el uso, el manejo y la pendiente del suelo, y temporalmente como resultado de los cambios en el contenido de humedad del suelo.

Con la condicionante de que si $0.2Sr \leq Rd$ entonces $Q_s > 0$, de lo contrario si $Rd < 0.2Sr$, $Q_s = 0$ y no se genera escurrimiento. Por otro lado, el potencial máximo de retención se define con:

$$Sr = 25.4 \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right) \quad (3.4)$$

En la expresión (3.4), NC (o en el idioma inglés CN : Curve number) es el número de curva para el día.

3.2.2. Método de las curvas numéricas

Este método, se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal.

Las Curvas Numéricas son una representación general de los coeficientes de escurrimiento basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de los Estados Unidos y dependen del: a) Grupo de suelo, b) Condición hidrológica, c) Uso del suelo y d) Humedad antecedente.

3.2.2.1. Grupo de suelo

Utilizando las características texturales de los suelos, el SCS, los clasificó en cuatro grupos de acuerdo con sus características hidrológicas para producir escurrimiento, tal como se muestra en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Grupo de suelo hidrológico

GRUPO HIDROLÓGICO	TEXTURA DEL SUELO
A	Áreas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables (Gruesa)
B	Arenas finas y limos (Media)
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla (Fina)
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables

Fuente: Aparicio, 2001.

3.2.2.2. Condición hidrológica del área de drenaje

Este es un indicador de la cubierta vegetal y su variación depende de la densidad de la cobertura, de tal manera que se agrupan en tres grandes grupos por condición hidrológica, que se presentan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Condiciones hidrológicas

CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN HIDROLÓGICA
Buena	Áreas regularmente quemadas. Menos del 50% de la superficie está protegida con plantas y dosel de árboles.
Regular	Con cobertura moderada con 50% a 75% de superficie protegida por vegetación.
Pobre	Con cobertura densa, más del 75% de la superficie protegida por vegetación

Fuente: McCuen, 2005.

3.2.2.3. Uso del suelo

La utilización de los terrenos ya sea como áreas de cultivo, pastizales o bosques tiene influencia en el escurrimiento y esto es más notorio cuando además, de la cubierta vegetal, se desarrollan tratamientos al suelo o se realizan sistemas de siembra en hilera, siembra de cultivos tupidos, en surco recto o al contorno o alguna práctica mecánica. Por esta razón a partir de los usos del suelo, se obtuvieron los valores de *CN* para diferentes condiciones hidrológicas y tipos de suelos; dichos valores se presentan en los Cuadros 3.4 y 3.5.

Cuadro 3.4. Valores del NC para uso urbano del suelo

Descripción del uso del suelo		NC para los grupos de suelo hidrológico			
		A	B	C	D
Áreas urbanas completamente desarrolladas ^a (vegetación establecida) Áreas abiertas, parques, césped, campos de Golf, cementerios, etc.					
Óptimas condiciones: cobertura de pastos en 75 % del área o más.		39	61	74	80
Condiciones aceptables: cobertura de pastos de 50 a 75 % del área		49	69	79	84
Condición pobre: cobertura de pastos menor del 50 % del área.		68	79	86	89
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos , etc.		98	98	98	98
Carreteras y caminos					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Basureros		72	82	87	89
	% de impermeabilidad ^b				
Pavimentadas con cunetas abiertas		83	89	92	93
Áreas empresariales y comerciales	85	89	92	94	95
Distritos industriales	72	81	88	91	93
Fraccionamientos, poblados y áreas residenciales con tamaño de 1/8 de acre o menos.	65	77	85	90	92
Residencial: Tamaño promedio del lote					
¼ de acre	38	61	75	83	87
1/3 de acre	30	57	72	81	86
de acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82
Áreas urbanas desarrolladas ^c (vegetación no establecida)					
Áreas recientemente clasificadas		77	86	91	94
Áreas urbanas del desierto occidental					
Paisaje del desierto natural (solo área permeable)		63	77	85	88
Paisaje desértico artificial		96	96	96	96

Cuadro 3.5. Valores del NC para uso agrícola del suelo

Descripción del uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	NC del grupo de suelo hidrológico.				
			A	B	C	D	
Suelo agrícola cultivado							
Barbecho	Surcos rectos o suelo desnudo	-	77	86	91	94	
	Labranza de conservación	Pobre	76	85	90	93	
	Labranza de conservación	Buena	74	83	88	90	
Cultivos en línea	Surcos continuos	Pobre	72	81	88	91	
	Surcos continuos	Buena	67	78	85	89	
	Labranza de conservación	Pobre	71	80	87	90	
	Labranza de conservación	Buena	64	75	82	85	
	Contorneado	Pobre	70	79	84	88	
	Contorneado	Buena	65	75	82	86	
	Contorneado y cultivos de conservación	Pobre	69	78	83	87	
	Contorneado y cultivos de conservación	Buena	64	74	81	85	
	Contorneado y terrazas	Pobre	66	74	80	82	
	Contorneado y terrazas	Buena	62	71	78	81	
	Contorneados y terrazas con cultivos de conservación	Pobre	65	73	79	81	
	Contorneados y terrazas con cultivos de conservación	Buena	61	70	77	80	
	Granos pequeños	Surcos continuos	Pobre	65	76	84	88
		Surcos continuos	Buena	63	75	83	87
Cultivos de conservación		Pobre	64	75	83	86	
Cultivos de conservación		Buena	60	72	80	84	
Contorneado		Pobre	63	74	82	85	
Granos pequeños	Contorneado	Buena	61	73	81	84	
	Contorneado y cultivos de conservación	Pobre	62	73	81	84	
	Contorneado y cultivos de conservación	Buena	60	72	80	83	
	Contorneado y terrazas	Pobre	61	72	79	82	
	Contorneado y terrazas	Buena	59	70	78	81	
	Contorneado y terrazas con	Pobre	60	71	78	81	
Granos pequeños	cultivos de conservación						
	Contorneado y terrazas con cultivos de conservación	Buena	58	69	77	80	
Leguminosas o praderas con rotación de cultivos	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89	
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85	
	Contorneo	Pobre	64	75	83	85	
	Contorneo	Buena	55	69	78	83	
	Contorneo y terrazas	Pobre	63	73	80	83	
	Contorneo y terrazas	Buena	51	67	76	80	
Tierra agrícola no cultivada áreas de	Tratamiento no mecanizado	Pobre	68	79	86	89	
	Tratamiento no mecanizado	Media	49	69	79	84	

Descripción del uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	NC del grupo de suelo hidrológico.			
			A	B	C	D
pastoreo	Tratamiento no mecanizado	Buena	39	61	74	80
	Contorneado	Pobre	47	67	81	88
	Contorneado	Media	25	59	75	83
	Contorneado	Buena	6	35	70	79
Pradera permanente		—	30	58	71	78
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos		Pobre	55	73	82	86
		Media	44	65	76	82
		Buena	32	58	72	79
Matorral		Pobre	48	67	77	83
		Media	35	56	70	77
Bosque o selva		Buena	30	48	65	73
		Pobre	45	66	77	83
		Media	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Fincas		—	59	74	82	86
Áreas de bosques Herbáceas		Pobre	g	80	87	93
		Media		71	81	89
		Buena		62	74	85
Robles-álamos		Pobre		66	74	79
		Media		48	57	63
		Buena		30	41	48
Juniperus		Pobre	g	75	85	89
		Media		58	73	80
		Buena		41	61	71
Salvia-pastos		Pobre		67	80	85
		Media		51	63	70
		Buena		35	47	55

a. Para usos de suelo con áreas impermeables, los números de curva se calcularon asumiendo que 100% de las áreas impermeables son conectadas directamente al sistema de drenaje. Las áreas permeables (césped) son consideradas como equivalente a los céspedes en buenas condiciones. Áreas impermeables tienen un NC de 98.

b. Incluye calles pavimentadas.

g. Los número de curva del grupo A ha sido desarrollado sólo para desiertos arbustivos

Fuente: McCuen, 2005.

3.2.2.4. Condición de humedad antecedente

El SCS citado por Neitsch, *et al.* (2002a) define tres condiciones de humedad antecedente: I Seco, que corresponde al Punto de Marchitamiento Permanente (PMP); II Humedad media; y III: Húmedo, que corresponde a la Capacidad de Campo (CC), es

decir; se han presentado altas precipitaciones y bajas temperaturas dentro de los últimos cinco días. El NC , corresponde a los valores obtenidos de los Cuadros 3.4 y 3.5. Para los tres casos, el NC se calcula con las siguientes ecuaciones, en las que NC_1 , es el número de curva para la condición de humedad I, NC_2 , el correspondiente a la condición II y NC_3 a la condición III:

$$NC_1 = NC_2 - \frac{20(100 - NC_2)}{100 - NC_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - NC_2)]} \quad (3.5)$$

$$NC_3 = NC_2 - \exp[0.00673(100 - NC_2)] \quad (3.6)$$

3.2.2.5. Ajustes por pendiente

Los NC para la condición de humedad II dados en los cuadros, son apropiadas para una pendiente de 5%, por lo que para valores distintos de pendiente deben ajustarse; ello puede hacerse con la fórmula (3.7) desarrollada por Williams (1995), citado por Neitsch, *et al.* (2002a).

$$NC_{2s} = \frac{NC_3 - NC_2}{3} [1 - 2 \exp(-13.86slp)] + NC_2 \quad (3.7)$$

En esta expresión, NC_{2s} es el NC para la condición de humedad II ajustado por pendiente, NC_3 es el NC para la condición de humedad III para la pendiente por defecto

de 5%, NC_2 es el NC para la condición de humedad II para la pendiente por defecto de 5% y slp es la pendiente promedio de la subcuenca (en %).

El ajuste por pendiente para la condición III se hace con la expresión (3.8) que es muy similar a la (3.6), salvo por el subíndice S de NC ; es decir que se introduce el NC_{2S} , obtenido de la expresión (3.7) para obtener la NC_{3S} , que es el valor corregido por pendiente.

$$NC_{3S} = NC_{2S} \cdot \exp[0.00673(100 - NC_{2S})] \quad (3.8)$$

3.2.3. Gasto pico de escurrimiento

El gasto pico de escurrimiento q_p , es el máximo flujo de escurrimiento que ocurre para un evento de lluvia dado; es un indicador del poder erosivo de una tormenta y se usa para predecir la pérdida de sedimento. SWAT, lo calcula por el Método Racional Modificado, que es ampliamente aplicado al diseño de bordos, canales y sistemas de control de avenidas.

El Método Racional asume que si una lluvia de intensidad I inicia en un tiempo $t=0$ y continúa indefinidamente, la velocidad de escurrimiento se incrementará hasta que el tiempo de concentración $t = tc$, cuando el área de la cuenca entera esté contribuyendo al flujo de salida y emplea la fórmula (3.9) para su cálculo; en la que q_p , es el gasto máximo de escurrimiento (en $m^3 s^{-1}$), C_e es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), I es la intensidad de lluvia (en $mm h^{-1}$), A_c es el área de la cuenca (en km^2) y el factor 3.6 es para la conversión de unidades.

$$q_p = \frac{Ce \times I \times Ac}{3.6} \quad (3.9)$$

El q_p depende también del tiempo de concentración tc , que es el tiempo que tarda en llegar el agua desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida de la misma; se obtiene sumando el tiempo que el flujo tarda en ir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el cauce principal t_{ov} y el tiempo correspondiente al flujo en el cauce principal t_{ch} , según la expresión (3.10), en la que todos los términos están dados en h.

$$tc = t_{ov} + t_{ch} \quad (3.10)$$

El t_{ov} se obtiene de la expresión (3.11), en la que Ls es la longitud de la pendiente de la cuenca o subcuenca (en m); n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional) y t_{ch} , de la (3.12), en la que Lc es la longitud del cauce principal de la cuenca (en km) y v_c , es la velocidad promedio del flujo en el cauce (en $m\ s^{-1}$), y 3.6 es un factor de conversión de unidades.

$$t_{ov} = \frac{Ls^{0.6} \times n^{0.6}}{18 n^{0.3}} \quad (3.11)$$

$$t_{ch} = \frac{Lc}{3.6 v_c} \quad (3.12)$$

3.2.4. Factor de erosividad de la lluvia

La erosividad de la lluvia, definida como su capacidad potencial para causar erosión, se mide por medio de los índices de erosividad. Los índices más importantes y de aplicación geográfica más amplia, son EI_{30} , $KE > 25$, de Alm, de Ram y de Fournier.

El EI_{30} fue propuesto por Wischmeier (1959), citado por Figueroa *et al.*, (1991) y es definido como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}); la expresión (3.13), mide el efecto en que la erosión por salpicamiento y la turbulencia del flujo se combinan con el escurrimiento para remover del terreno las partículas del suelo separadas de éste.

$$R = \sum_{i=1}^m (E I_{30})_i \quad (3.13)$$

En la expresión (3.13), R es el factor de erosividad de la lluvia o índice de erosividad anual (en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), y m es el número de eventos al año.

Figueroa, *et al.*, (1991), propuso la expresión (3.14) para el cálculo de R a partir de la precipitación anual (Pp):

$$R = 2.4619Pp + 0.006067Pp^{(2.055-0.000061Pp)} \quad (3.14)$$

Considerando el escaso número de estaciones meteorológicas en el país que cuentan con pluviógrafos, Cortés (1991), regionalizó el territorio nacional en 14 áreas, como se ilustra en la Figura 3.5, y con base en un análisis de regresión estimó el valor de R , en función de la precipitación anual; las ecuaciones correspondientes para cada región se presentan en el Cuadro 3.6, en las que R representa la erosividad de la lluvia (en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), y P es la precipitación media anual en (mm).



Figura 3.4. Regionalización de la República mexicana para estimar la erosividad de la lluvia
Fuente: Cortés, 1991.

Cuadro 3.6. Ecuaciones que estiman el factor R (EI_{30})

Región	Ecuación	R ²
I	$R = 1.2078P + 0.002276P^2$	0.92
II	$R = 3.4555P + 0.006470P^2$	0.93
III	$R = 3.6752P - 0.001720P^2$	0.94
IV	$R = 2.8959P + 0.002983P^2$	0.92
V	$R = 3.4880P - 0.000188P^2$	0.94
VI	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$	0.90
VII	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$	0.98
VIII	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$	0.98
IX	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$	0.97
X	$R = 6.8938P + 0.000442P^2$	0.95
XI	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$	0.98
XII	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$	0.96
XIII	$R = 10.7427P - 0.001008P^2$	0.97
XIV	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$	0.95

Fuente: Cortés, 1991.

3.2.5. Factor de erosionabilidad del suelo

El factor K , sugerido por Cook (1936), se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo a la erosión; está influida por algunas propiedades del mismo, tales como la distribución del tamaño de las partículas primarias, el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo, la presencia de óxidos de hierro y aluminio, las uniones electroquímicas, el contenido inicial de humedad y los procesos de humedecimiento y secado.

Wischmeier *et al.* (1971, citado por Figueroa, *et al.* 1991), elaboraron un nomograma que permite evaluar el factor K usando cinco parámetros del suelo: % de limos + arenas muy finas, % de arenas, % de materia orgánica, estructura y permeabilidad. En los Cuadros 3.7 y 3.8 se presentan los códigos de estructura y permeabilidad y el nomograma se presenta en la Figura 3.6.

Cuadro 3.7. Códigos de estructura para definir el valor de K

Código	Clase de estructura	Tamaño (mm)
1	Granular muy fina y grumosa muy fina.	< 1
2	Granular fina y grumosa fina.	1 – 2
3	Granular media, grumosa media y granular gruesa.	5 – 10
4	Laminar, prismática, columnar, masiva y granular muy gruesa.	> 10

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978 citados por Figueroa, *et al.* 1991.

Cuadro 3.8. Códigos de permeabilidad del suelo para definir el valor de K

Textura	Código	Clasificación	Conductividad Hidráulica CH
			mm/h
Arenosa	1	Rápida a muy rápida	> 60
Franco arenosa	2	Moderadamente rápida	20 – 60
Arena francosa, Franco, franco limosa	3	Moderada	5 – 20
Franco arcillo arenosa	4	Moderadamente lenta	2 – 5
Franco arcillosa, Franco limo arcillosa	5	Lenta	1 – 2
Arcillo arenosa, Arcillo limosa, arcillosa	6	Muy lenta	< 1

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978 citados por Figueroa, *et al.* 1991.

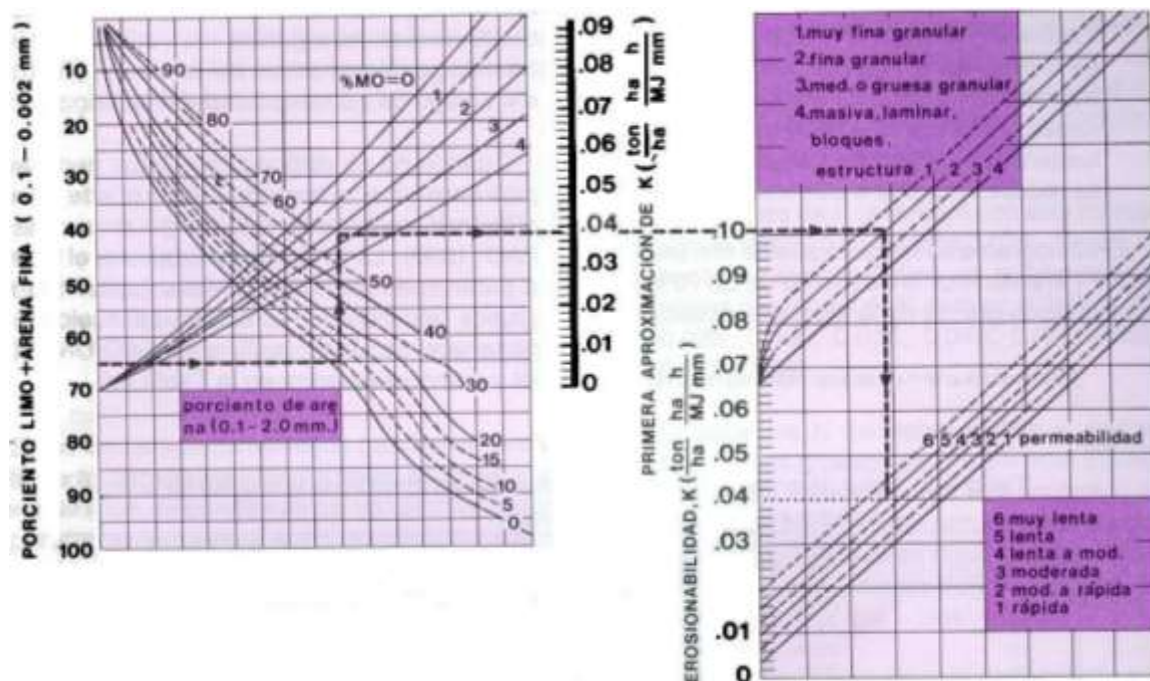


Figura 3.5. Nomograma para evaluar el factor K de erosionabilidad del suelo

Cuando no se cuenta con los datos necesarios para utilizar el procedimiento anterior, se puede utilizar la metodología propuesta por la FAO (1980) para estimar el valor de K , a partir de la textura superficial y la unidad del suelo según el propio sistema de clasificación FAO suelo (Figueroa, *et al.* 1991).

El procedimiento para evaluar el factor K utilizando la metodología FAO consiste en:

- a) Determinar la unidad de suelo o grupo de unidades de suelos asociados entre sí, tal y como se encuentra cartografiado en los mapas edafológicos que edita el INEGI, así como también la textura correspondiente a cada unidad.
- b) Posteriormente se utiliza el Cuadro 3.9 de doble entrada y se ubica el tipo de suelo y la textura correspondiente a dicha unidad, obteniendo de esta manera el valor de K de cada una de las unidades.

Cuando se tienen unidades de suelos asociados, la Dirección General de Política Agrícola (1994) de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, ahora SAGARPA), sugiere asignar a la primera unidad de suelo un factor de ponderación de 0.70, a la segunda unidad un factor de 0.20 (o de 0.30 cuando son sólo dos unidades) y de 0.10 para la tercera unidad de suelo (Figueroa, *et al.* 1991).

Cuando no se tienen los datos necesarios para utilizar el procedimiento anterior, se puede utilizar el Cuadro 3.10, la cual presenta valores de K en base a la textura y contenido de materia orgánica del suelo.

Cuadro 3.9. Valores del factor de erosionabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial

Orden	Textura			Orden	Textura			Ordenes de suelo de la clasificación FAO	
	G	M	F		G	M	F	Nombre	Símbolo
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013	Acrisoles	A
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026	Cambisoles	B
Ag	0.026	0.030	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026	Chernozem	C
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a, g)	0.026	0.040	0.013	Podzoluvisoles	D
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d, e, b)	0.013	0.020	0.007	Rendzinas	E
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d, e, x)	0.013	0.020	0.007	Ferrosoles	F
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	G
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026	Feozem	H
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Litosoles	I
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013	Fluvisoles	J
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013	Kastañozem	K
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026	Luvisoles	L
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	M
BK	0.026	0.040	0.013	Q(a, c, f, l)	0.013	0.020	0.007	Nitrosoles	N
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013	Histosoles	O
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013	Podzoles	P
C(g, h, b, l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007	Arenosoles	Q
D(d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013	Regosoles	R
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026	Solonetz	S
F(a, b, o, p, r)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026	Andosoles	T
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026	Rankers	U
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013	Vertisoles	V
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026	Planosoles	W
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013	Xerosoles	X
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007	Yermosoles	Y
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007	Solonchak	Z
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013		
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013		
Gv	0.013	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007		
H(c, g, h, l)	0.013	0.020	0.007	V(c, p)	0.053	0.079	0.026		
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026		
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026		
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026		
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013		
Ge	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013		
Gt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.026	0.079	0.026		
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026		
K(h, K, l)	0.026	0.040	0.013	X(b, h, l, y)	0.053	0.079	0.026		
L	0.026	0.040	0.013	Y(h, k, l, y, t)	0.053	0.079	0.026		
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.053	0.040	0.013		
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013		
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007		
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.26	0.040	0.013		
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026		

La textura se clasifica en: G=Gruesa; M=Mediana; F=Fina

Fuente: Figueroa, *et al.* 1991.

Cuadro 3.10. Valores del factor de erosionabilidad (K) en función de la textura y contenido de materia orgánica

Textura	% de materia orgánica		
	0.0-0.5	0.5-2.0	2.0-4.0
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.010
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena migajosa	0.012	0.010	0.008
Arena fina migajosa	0.024	0.020	0.016
Arena muy fina migajosa	0.044	0.038	0.030
Migajón arenosa	0.027	0.024	0.019
Migajón arenosa fina	0.035	0.030	0.024
Migajón arenosa muy fina	0.047	0.041	0.033
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón limoso	0.048	0.042	0.033
Limo	0.060	0.052	0.042
Migajón arcillo arenosa	0.027	0.025	0.021
Migajón arcillosa	0.028	0.025	0.021
Migajón arcillo limosa	0.037	0.032	0.026
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arcilla	0.013	0.035	0.029

Fuente: USDA-ARS, 1975 citado por Oropeza, 2006.

3.2.6. Factor de cobertura y manejo

El parámetro de cobertura y manejo o simplemente de vegetación C , definido como el cociente de pérdida de suelo en un terreno cultivado bajo condiciones específicas de desnudez y con barbecho (Wischmeier y Smith, 1978), representa la capacidad de la vegetación para impedir el arrastre de sedimentos; es decir que si el suelo permanece desnudo durante la época de lluvias, su capacidad de permitir el arrastre de material es más alta que si tiene algún tipo de cobertura, de tal forma que su determinación requiere de un análisis temporal, donde se conjuga la presencia de lluvia (factor R), con la desnudez del suelo. Debido a que el parámetro C representa un factor de reducción de erosión, carece de unidades.

El dosel de la planta afecta la erosión reduciendo la energía efectiva de la lluvia al interceptar las gotas. Las gotas que caen del dosel (por ejemplo de las copas de los árboles) pueden recuperar velocidad pero es menor que con la que originalmente caían. La altura promedio de la cual caen las gotas desde el dosel y su propia densidad determina la reducción de la energía de la lluvia antes de volver a caer al suelo. Es más efectivo tener el suelo cubierto con residuos que tener un dosel vegetal, ya que por estar al nivel del suelo no se recupera velocidad.

CONAGUA (2006), establece que para determinar la distribución espacial de C , es necesario conocer con detalle el uso actual de suelo, para lo cual en la actualidad se recurre comúnmente al empleo de imágenes de satélite y los resultados obtenidos mediante su estudio se confirman con el análisis de áreas de entrenamiento en campo. En este caso, para la determinación del parámetro C , se pueden emplear los Cuadros 3.11, 3.12 y 3.13.

3.2.7. Factor de prácticas de conservación

CONAGUA (2006), define el factor de prácticas de conservación P , como el cociente entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación dada y aquella correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente.

Las prácticas de conservación pueden dividirse en prácticas no estructurales y estructurales las primeras se refieren a manejo del suelo y de los cultivos y que se aplican diariamente y que a largo plazo resultan en un desarrollo sustentable de la

cuenca; las prácticas estructurales se refieren a obras de tipo estructural y se utilizan para rehabilitar las áreas que ya no responden a las prácticas no estructurales.

Cuadro 3.11. Valores de *C* para pastizales, matorral y arbustos

Cubierta vegetal	Cubierta en contacto con el suelo		Porcentaje de cobertura del suelo					
Tipo y altura de la cubierta	%	Tipo	0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
Plantas herbáceas y matorrales (0.5 m)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.082	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.075	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.031	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.067	0.038	0.011
Matorral (2 m)	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.085	0.042	0.110
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.08	0.036	0.012	0.003
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.077	0.010	0.011
Arbolado sin matorral pequeño apreciable (4 m)	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.085	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011

G: Cubierta en contacto con el suelo formada por pastizal con al menos 5 cm de humus.

W: Cubierta en contacto con el suelo formada por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer.

Fuente: Wischmeier y Smith, (1978).

Cuadro 3.12. Factor *C* para bosques

% de cubierta	% de cubierta en contacto con el suelo ⁽¹⁾	Tipo de ordenación ⁽²⁾	
		<i>C</i>	<i>MSC</i>
100 - 75	100 - 90	0.001	0.003 - 0.011
75 - 40	90 - 70	0.002 - 0.003	0.010 - 0.030
40 - 20	70 - 40	0.003 - 0.009	0.030 - 0.090

Formada por al menos de restos vegetales o plantas herbáceas.

(1) *C* = montes con control estricto de pastoreo; *MSC* = montes sin control de pastoreo.

(2) Para cubiertas en contacto con el suelos inferiores al 40% o cubierta menor del 20%, deben usarse los valores del Cuadro 3.11.

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

Cuadro 3.13. Valores de *C* para cultivos

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.00
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de mulch	0.001
Sabana o pradera herbáceas o en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbáceas sobrepastada	0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.20 - 0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.50 - 0.90
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02 - 0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12 - 0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30 - 0.45
Algodón	0.40 - 0.70
Pradera herbácea	0.01 - 0.03
Soja	0.20 - 0.50
Trigo	0.10 - 0.40
Arroz	0.10 - 0.20
Cacahuete	0.30 - 0.80
Palmera, cafeto, cocotero con cobertura vegetal	0.10 - 0.30
Piña cultivada a nivel con retirada de residuos	0.10 - 0.40
Piña cultivada a nivel con residuos en superficie	0.01
Patata con surcos según la pendiente	0.20 - 0.50
Patata con surcos transversales a la pendiente	0.10 - 0.40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.27
Granado con cobertura de malas hierbas	0.08
Granado limpio de malas hierbas	0.56
Caña de azúcar	0.13 - 0.40
Guisante de Angola	0.60 - 0.70
Pimiento o Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano: después de su establecimiento	0.05 - 0.10
Papaya	0.21

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

El factor *P* considera la acción de las prácticas de conservación y su valor adimensional se encuentra entre 0 y 1. Las prácticas consideradas comúnmente son: los surcos al contorno, el cultivo en fajas y las terrazas, en estas prácticas son necesarios canales especiales que drenan el exceso de lluvia. Los surcos en contorno son más efectivos en

pendientes del 3 al 8%. El Cuadro 3.14 muestra valores para P y límites de longitudes de pendiente.

CONAGUA (2006), establece que cuando se introducen cultivos en suelos con pendientes, en ocasiones se utilizan prácticas mecánicas que reducen el escurrimiento del agua y por consecuencia la cantidad de suelo que se puede transportar. Este parámetro se refiere a las prácticas mecánicas y de labranza que modifican la estructura del suelo, retrasando o incrementando la susceptibilidad del material de ser arrastrado; Cuando P toma valores cercanos a cero, indica que el suelo no está siendo erosionado debido a las prácticas mecánicas de conservación; y cuando toma el valor de 1, indica que se tiene la erosión máxima o potencial debido a que no existen prácticas. Estas variaciones son estimadas, ya sea generando valores medios anuales para evaluaciones globales, o bien en evaluaciones temporales para generar un acumulado por temporada.

Cuadro 3.14. Valores de factor P para surcado al contorno, fajas al contorno y terraceo

Pendiente del terreno (%)	Cultivo al contorno		Cultivo en fajas al contorno y surcos irrigados			Terraceo
	Longitud Máxima (m)	Valor de P	Valor de P	Longitud máxima (m)	Ancho máximo (m)	
1-2	122.0	0.60	0.30	244.0	40.0	0.12
3-8	91.5-61	0.50	0.25	183-122	30.0	0.10
9-12	36.6	0.60	0.30	73.2	24.4	0.12
13-16	24.4	0.70	0.35	48.8	24.4	0.14
17-20	18.3	0.80	0.40	36.6	18.3	0.16
21-25	15.2	0.90	0.45	30.0	15.2	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.

En el Cuadro 3.15 se exhiben valores de P para diferentes prácticas de conservación, en el que se observa que las prácticas con mejores resultados para atenuar el proceso de erosión son las terrazas de banco y de zing, por el contrario son las que reducen en menor proporción el proceso de erosión son los surcos al contorno y rectos.

Cuadro 3.15. Valores del factor P para diferentes prácticas de conservación

Práctica	Valor de P
Surcado al contorno	0.75-0.9
Surcos rectos	0.8-0.95
Franjas al contorno	0.6-0.8
Terrazas (2-7 % de pendiente)	0.5
Terrazas (7-13 % de pendiente)	0.6
Terrazas (mayor de 13 %)	0.8
Terrazas de Banco	0.1
Terrazas de Banco en contrapendiente	0.05
Surcado lister	0.5
Ripper	0.6
Terrazas de Zing	0.1

Fuente: Martínez, 2008

3.2.8. Factor topográfico

Arellano (1994), indica que la configuración topográfica del terreno define las diferentes facetas de pendientes de un terreno y que es importante porque representa el gradiente hidráulico del escurrimiento superficial que proporciona la energía que incrementa la velocidad del agua y su capacidad para desprender y acarrear las partículas del suelo.

La pendiente S como la longitud de la misma L , definen la topografía de un terreno y afecta significativamente la tasa de erosión hídrica (Wischmeier y Smith, 1978, citados por Arellano, 1994).

El factor topográfico LS es la relación esperada de la pérdida de suelo por unidad de área de un campo con pendiente, con respecto a un terreno que tiene una pendiente de 22.1 m de longitud con 9 % de inclinación o bajo otras condiciones idénticas, y se calcula con la expresión (3.15), en la que L_h , es la longitud de la pendiente (en m); m es un término exponencial (adimensional) y α_h , es el ángulo de la pendiente (en grados).

$$LS = \left(\frac{L_h}{22.1} \right)^m (65.41 \times \text{sen}^2 \alpha_h + 4.56 \times \text{sen} \alpha_h + 0.065) \quad (3.15)$$

El término exponencial m se calcula con la expresión (3.16), donde Sh es la pendiente de la Subcuenca o Unidad de Respuesta Hidrológica (URH), expresada como elevación sobre distancia (en m/m) y obtenida de la expresión (3.17).

$$m = 0.6[1 - \exp(-35.835 \times Sh)] \quad (3.16)$$

$$Sh = \tan \alpha_h \quad (3.17)$$

Para su cálculo y aplicación, el factor topográfico LS , se puede separar en sus dos factores dado que éstos se multiplican, lo cual constituye una ventaja en el cálculo. En

este contexto, L es el factor adimensional de longitud de la pendiente (Lh) (y no la longitud real de la pendiente), por lo que se expresa como la relación de la pérdida de suelo de una longitud de pendiente dada respecto a una longitud de pendiente de 22.1 metros bajo las mismas condiciones (Meyer, 1984, citado por Arellano, 1994); Lh se define como la distancia del parteaguas o punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde el gradiente de la pendiente disminuye provocando la depositación o bien donde el escurrimiento llega a una corriente superficial de un cauce definido; por lo tanto la selección adecuada de Lh es difícil y es función de la precisión de la identificación de los cauces naturales y de los puntos donde ocurre la depositación: esta tarea sin embargo, puede facilitarse si se cuenta con modelos de elevación digital del terreno, y un software que permita hacerlo de manera automatizada.

En este caso, el factor L se obtiene de la expresión (3.18), en la que m es un exponente que está en función de la correlación de la pendiente, de la longitud de la misma y de las propiedades del suelo y sus condiciones de manejo y se calcula a partir de la expresión (3.16).

$$L = \left(\frac{Lh}{22.1} \right)^m \quad (3.18)$$

Análogamente, S es el factor adimensional de la pendiente del terreno α_h en ladera o perfil (y no la pendiente real del terreno); su cálculo se hace con:

$$S = 65.41 \times \text{Sen}^2 \alpha_h + 4.56 \times \text{Sen} \alpha_h \quad 0.065 \quad (3.19)$$

3.2.9. Factor de fragmento grueso

El factor de fragmento grueso FG se calcula con la expresión (3.20), en la que Rs es el porcentaje de rocas en la capa superficial del suelo (en %) (Neitsch *et al.*, 2002a).

$$FG = \exp(-0.053 Rs) \quad (3.20)$$

3.3. EL MODELO SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Guzmán, *et al.* 2004).

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para la modelación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (URH) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes (Guzmán, *et al.* 2004).

Las URH son áreas contiguas dentro de las subcuencas que tienen una misma cubierta vegetal, un mismo tipo de suelo, e igual manejo. No importa qué tipo de problemas se estudien con SWAT, el balance de agua toma relevancia sobre cualquier cosa en la cuenca. Así, la predicción precisa del movimiento de pesticidas, sedimentos o nutrientes, el ciclo hidrológico simulado por el modelo, debe indicar lo que está sucediendo en la cuenca (Neitsch, *et al.* 2002a).

Neitsch, *et al.* (2002a) considera que el éxito de la simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico, de la manera más detallada y precisa posible, por lo que el SWAT para los cálculos considera el aspecto del Balance Hídrico.

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación (3.21):

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3.21)$$

Donde:

SW_t : es el contenido de agua en el suelo el día t

SW : es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar

t : es el tiempo en días

R : es la precipitación diaria en mm

Q : es la cantidad de escorrentía diaria en mm

ET : la evapotranspiración diaria en mm

P : la percolación diaria en mm

QR : el flujo de retorno o flujo base en mm

La cantidad de escurrimiento es estimado aplicando la metodología del Número de la Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que el escurrimiento está determinado por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua también llegará hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammam y Priestley-Taylor.

Las variables climáticas utilizadas por el SWAT son la precipitación, la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles deben ser ingresadas directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y precipitación

diaria. Para aplicaciones prácticas, se recomienda utilizar las simulaciones del simulador de clima como última opción.

La producción de sedimentos es calculada para cada unidad de respuesta hidrológica con la EUPSM (Oñate y Aguilar, 2003).

Para su aplicación, el modelo se integra al software ArcView, empleado por excelencia para la elaboración y manipulación de sistemas de información geográfica. La Figura 3.7, muestra la pantalla o menú principal de SWAT.

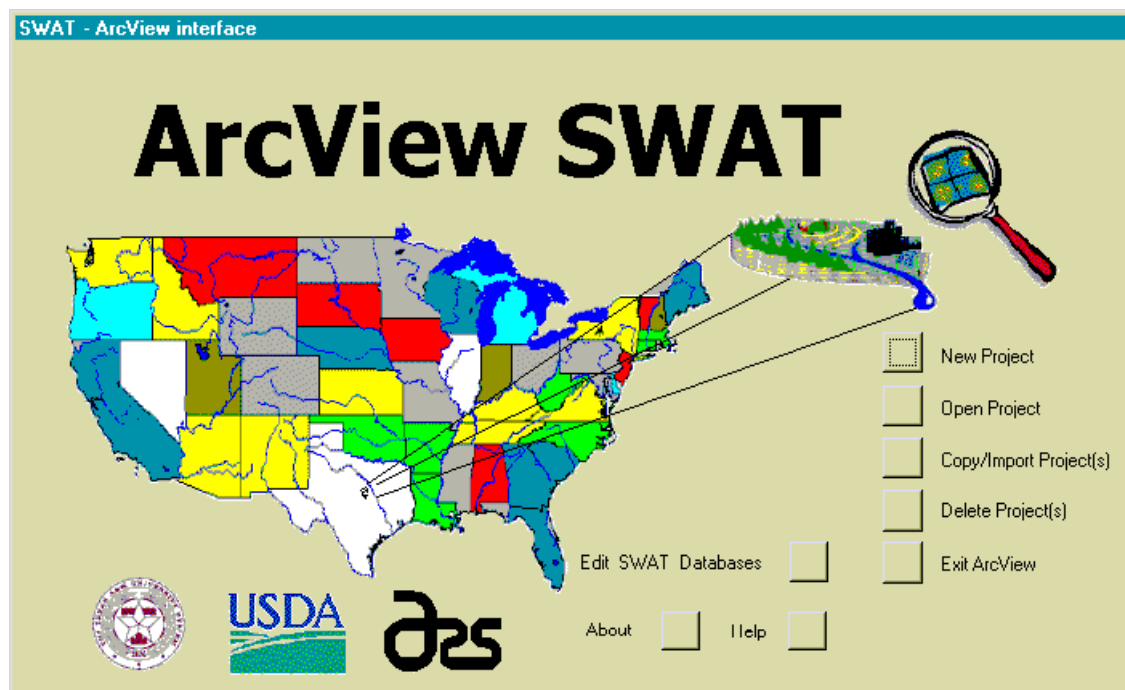


Figura 3.6. Menú principal del modelo SWAT como su interface de ArcView

3.4. SENSORES REMOTOS

Una imagen digital es una imagen $f(x,y)$ que ha sido discretizada en coordenadas espaciales y espectrales. Una imagen digital puede considerarse como una matriz cuyos índices del renglón y columna identifican un punto en la imagen y el correspondiente valor del elemento de la matriz que identifica el nivel de intensidad de luz en ese punto. Los elementos de tal arreglo digital son llamados *elementos de imagen*, *elementos de pintura*, *pixels* o *pels* (estos dos últimos son abreviaturas del inglés *picture elements*) (De la Fraga, 2001).

Campbell (2002) citado por CONAGUA (2006), define los Sensores Remotos como la práctica de obtención de información del terreno y de la superficie del agua, usando imágenes adquiridas desde el espacio mediante el uso de radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida de la superficie terrestre.

Aronoff (2005) citado por CONAGUA (2006), refiere que la fuente de energía reflejada por el objeto puede ser la radiación del sol o algún tipo de energía emitida por el propio sistema del Sensor Remoto (SR), lo cual implica que se puedan tener varias formas de productos con datos censados remotamente, y que incluyen la fotografía aérea, las imágenes digitales de satélite y las imágenes generadas con señales láser o de radar, según se muestra en el esquema de la Figura 3.8.

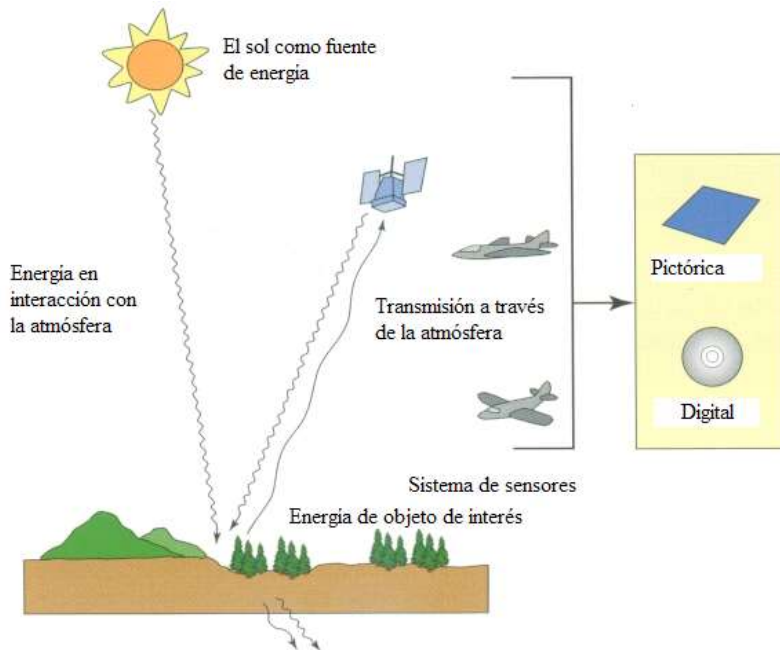


Figura 3.7. Fuentes de energía empleados por los sensores remotos

Los sistemas de SR difieren en el nivel de detalle o resolución que pueden capturar. Aronoff (2005) citado por CONAGUA (2006), dice que hay cuatro diferentes tipos de resolución de los sensores remotos, cuyo conocimiento es muy importante para la correcta interpretación de la información biofísica obtenida en las imágenes; éstas son: resolución espectral, resolución espacial, resolución temporal y resolución radiométrica. La resolución se define como una medida de la habilidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que son espacialmente cercanas y espectralmente similares y los cuatro tipos de resolución de una imagen afectan su idoneidad para una aplicación específica y define el método usado para el análisis. La resolución espectral se refiere al número y dimensión de intervalos específicos de longitud de onda en el espectro electromagnético para los cuales es sensitivo el instrumento del sensor remoto y se asocia con el número de bandas que capta, así como su ancho y posición.

Para fines prácticos, la resolución espacial nominal se define como la dimensión en metros del área instantánea proyectada IFOV (Instantaneous Field of View o Campo de Vista Instantáneo) y que corresponde con el tamaño del píxel. Sobre este particular Aronoff (2005) citado por CONAGUA (2006), agrega que el tamaño de las características que se pueden ver en una imagen de SR, está determinada por tres factores: las características del objetivo y del fondo, la escala de la imagen y el poder de resolución del sistema; e indica que, adicionalmente, varios factores pueden degradar la calidad de la imagen y reducir la efectividad de su resolución espacial, entre las que se incluyen la pobre iluminación de la escena y las condiciones de la atmósfera, dadas por la presencia de humo, polvo o bruma.

La resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que se toman las imágenes de una misma área. Y la resolución radiométrica, por otra parte, se define como la sensibilidad de un detector de SR para diferenciar la intensidad de señales como registros de flujo radiante reflejada o emitida desde la tierra, y puede asociarse con el número de bits con los que el sensor registra la energía radiante, por lo que consecuentemente tiene un impacto significativo en la habilidad para medir las propiedades de los objetos de la escena (Jensen, 2000 citado por CONAGUA 2006).

De la Fraga (2001), modela los pasos fundamentales que se siguen en el procesado de imágenes como se representa en esquema de la Figura 3.9.

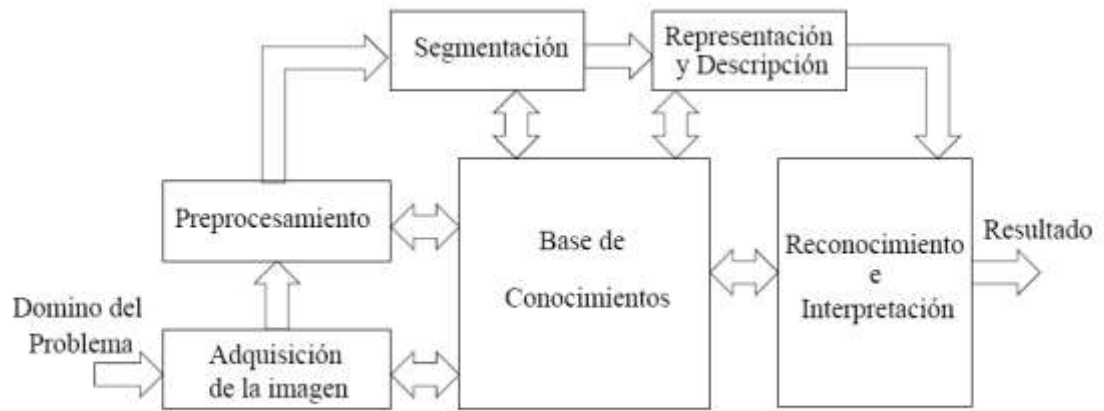


Figura 3.8. Pasos fundamentales del proceso de imágenes de satélite

De acuerdo con Campbell (2002) citado por CONAGUA (2006), este sistema se diseñó para proveer datos para estudios de uso del suelo, evaluación de recursos renovables, exploración de recursos geológicos y para trabajo de cartografía a escalas grandes.

El sistema SPOT tiene una resolución radiométrica de 8 bits, y una resolución temporal de 26 días, aunque como tiene cobertura estereoscópica, realmente toma una imagen de la misma área cada 4 o cuando más cada 5 días (dependiendo de la latitud del lugar), lo cual también implica que se pueden generar imágenes estereoscópicas.

El último satélite de este sistema, es el SPOT 5, que fue lanzado el 3 de mayo de 2002; lleva los instrumentos High Resolution Geometric (HRG) y High Resolution Stereoscopic (HRS) y el Vegetation 2, cuyas características de resolución espectral y espacial se exponen en el Cuadro 3.16, (Lillesand y Keifer, 2004 y Aronoff, 2005, citado por CONAGUA 2006).

Cuadro 3.16. Características de los sensores del satélite SPOT 5

Sensor	Bandas espectrales	Resolución espacial	Ancho de franja
	(μm)	(m)	(km)
High Resolution Geometric (HRG)	Pan: 0.48 – 0.71	2.5 o 5.0	60 – 80
	B1 : 0.50 – 0.59	10	
	B2 : 0.61 – 0.68	10	
	B3 : 0.78 – 0.89	10	
	B4 : 1.58 – 1.75	20	
High Resolution Stereoscopic (HRS) Vegetation 2	Pan: 0.49 – 0.69	5.0 – 10.0	120
	B1 : 0.45 – 0.52	1000	2,250
	B2 : 0.61 – 0.68	1000	
	B3 : 0.78 – 0.89	1000	
	B4 : 1.58 – 1.75	1000	

3.5. TRABAJOS ANTECEDENTES

El uso de modelos para la cuantificación de procesos erosivos es un aspecto crucial para la incorporación efectiva de estos procesos ambientales en la planificación del territorio. En general, los modelos utilizados para cuantificar la erosión hídrica consideran los siguientes factores: la precipitación (duración e intensidad), el suelo (agregación, textura, capacidad de infiltración), la vegetación (cobertura) y la topografía (pendiente y su longitud). Estos factores pueden sufrir importantes variaciones en el espacio y en el tiempo. Los modelos USLE, MUSLE y RUSLE fueron desarrollados con ánimo de ser aplicables de forma universal; sin embargo, la disponibilidad de los datos necesarios

para su uso se encuentra muy limitada fuera de los EEUU y esto, en ocasiones, dificulta su empleo en otros ámbitos geográficos. Esto se extiende, por ejemplo, a modelos que usan alguna de estas ecuaciones como SWAT, EPIC, WEPP, lo que obliga a un esfuerzo importante de adaptación de los modelos a los datos disponibles y a las distintas situaciones territoriales (Gómez *et al.*, 2007).

3.5.1. Sobre el factor topográfico *LS*

Reyes *et al.*, (1990), citado por Pando, *et al.*, 2003) utilizaron la EUPS para caracterizar la erosión hídrica laminar y en arroyuelos, en Oaxaca y encontraron que los factores de longitud y grado de pendiente fueron los que más influyeron en las pérdidas de suelo en los periodos de tiempo estudiados, por su parte Barrios (2000) en su trabajo “Distribución espacial del factor *LS* (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con Idrisi aplicando en una microcuenca Andina”, concluye que existe un elevado riesgo de sobrestimar el factor *LS* a escala de cuencas, cuando se considera la distribución espacial de la longitud de pendiente, en su lugar se recurre a procedimientos más simples tales como asumir longitud de pendiente constante e igual a 100 o utilizar una relación general en *LS* y pendiente.

Se tienen los antecedentes que en la estimación de la erosión mediante la EUPS, EUPSM y RUSLE, el principal problema es la estimación del factor *LS*, y en base a dicha limitante, Röder, *et al.*, (2006), en su trabajo “Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo “USLE” en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida sierra de Quila, en el estado de Jalisco”, llegó a la conclusión que los valores

de la pérdida potencial del suelo no deben interpretarse como valores absolutos, sino como valores de estimación, ya que la ecuación USLE no fue desarrollada para aplicarse bajo escenarios extremos de topografía; no obstante permite identificar y evaluar de manera aproximada el estado de peligro o riesgo de áreas susceptibles a la erosión.

3.5.2. Sobre la aplicación del modelo SWAT

En seguida se presentan algunas notas importantes que se obtuvieron en investigaciones en las que aplicaron el SWAT.

Torres, *et al.*, (2000) aplicaron el modelo de simulación hidrológica SWAT, en la cuenca “El Tejocote”, localizada en Atlacomulco, Estado de México con la finalidad de comparar los valores simulados y observados de la producción de agua, sedimentos, gastos medios y biomasa durante un período de cinco años de observación (1980-1985). Así mismo analizaron su posible aplicación en cuencas que no cuenten con estaciones de aforo, y encontraron que las estadísticas de calibración del modelo indican una satisfactoria predicción de la producción de agua y sedimentos entre lo simulado y lo observado, por lo que se recomiendan su uso en cuencas hidrográficas que no cuentan con estaciones de aforo para la planificación de los recursos naturales, manejo de los sistemas de explotación y obras de ingeniería agrícola.

Guzmán, *et al.*, (2004) emplearon el SWAT para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica del río Chaguana, ubicada en la Provincia de El Oro, Ecuador, con la finalidad presentar una herramienta de apoyo que ayudara a determinar

caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica, los cuales son de mucha importancia en un proyecto hidráulico. El modelo hidrológico fue seleccionado ya que puede ayudar a predecir posibles impactos en una cuenca debido al uso de suelo y aporte de sedimentos a un cauce, y encontró que debido a la carencia de datos que existen en ese país; como son precipitaciones diarias, caudales medidos y otros parámetros hidrológicos los resultados en este estudio fueron bastantes alentadores en el uso del SWAT.

Por su parte, Silva (2004), simuló de producción de agua en una cuenca montañosa pequeña de Venezuela mediante el modelo SWAT. Los valores diarios simulados se compararon con los medidos en un canal de aforo según índices de regresión y de diferencia. SWAT sobrestimó los valores diarios de escurrimiento superficial y subestimó los de caudal base, por lo que sugiere que para mejorar el funcionamiento del SWAT, deben realizarse ajustes simultáneos al valor del Número de Curva y a los factores de agua subterránea. Concluyó que la evaluación y calibración de SWAT es poco transferible debido a la gran cantidad de variables que pueden ser modificadas, por lo que es conveniente contar con información que permita ajustar las simulaciones particulares, y que además la coincidencia de valores acumulados medidos y simulados no implica buen funcionamiento del modelo en cuanto a lapsos parciales, podría existir compensación de errores en tendencias inconsistentes.

Torres, *et al.*, (2005) utilizaron, calibraron, validaron y aplicó el modelo SWAT en la cuenca del Río Laja ubicada en Guanajuato, México, la cual experimenta una variación

en sus suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos y, concluyeron que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la simulación del impacto del manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua y sedimentos.

De la revisión descrita sobre la aplicación del modelo SWAT se puede notar, que en todos los casos el uso del modelo está enfocado a la estimación de escurrimientos y, en ocasiones a sedimentos, por lo que es apreciable su poca o nula aplicación en la estimación de pérdida de suelo.

3.5.3. Sobre la erosión

En este apartado se destacan algunos trabajos sobre la erosión y en los que se hace notar, que cuando se trata de estimar sólo la pérdida de suelo, se emplea únicamente la EUPS mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, en algunos casos métodos directos y muy pocas veces se recurre a modelos complejos que en la mayoría de los casos de limitan por la falta de información que se requiere para alimentarlos.

Martínez, *et al.*, (2001), mencionan que la producción de sedimentos puede ser un indicador del impacto de los cambios de uso de suelo en las áreas de drenaje de las cuencas y de las modificaciones en los sistemas de drenaje que originan los incrementos en las tasas de degradación. Si la producción de sedimentos se relaciona con el área de drenaje, se genera lo que se conoce como tasa de degradación, la cual puede estar asociada con la erosión del suelo, a través de la relación de la producción de sedimentos y la erosión definida como tasa de entrega de un área de drenaje.

Martínez, *et al.*, (2001), en su trabajo “Relación sedimentos – erosión en la cuenca alta del Papaloapan” concluyeron que los SIG son una herramienta útil en el manejo y manipulación espacial de los factores involucrados en la estimación de la erosión y pueden utilizarse para predecir la producción de sedimentos en cuencas no aforadas, también concluye que con la información de producción de sedimentos observados en las estaciones hidrométricas y la estimación de la erosión hídrica, con base en modelos predictivos como la EUPS y la utilización de los Sistemas de Información Geográficos, se puede establecer la relación entre la producción de sedimentos y erosión para un área de drenaje.

En la mayoría de los casos el uso de la EUPS mediante los SIG es apoyo por los investigadores, ya que es una herramienta que puede desarrollarse con un bajo costo por su parte, Pando, *et al.*, (2003), considera que los métodos directos para la evaluación de la erosión hídrica suelen proporcionar datos precisos, pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos; en contra parte, los métodos indirectos para evaluar la tasa de erosión son relativamente fáciles de aplicar, pero su precisión no ha sido ampliamente probada para los diferentes usos de suelo

Rivera *et al.*, (2009) realizaron lotes experimentales en la microcuenca El Alote de la cuenca de Villa Victoria, Estado de México, para determinar los parámetros hidrológicos del sistema suelo-bosque-agua, y encontraron que en los lotes de escurrimiento como en la parcela agrícola se constató que el periodo crítico para la erosión del suelo es durante las primeras lluvias ya que se presenta del 50 al 70% de la pérdida de suelo total, y esto

es debido a que el suelo está desprotegido de la acción de las fuerzas erosivas de la lluvia y el escurrimiento porque el cultivo está en proceso de desarrollo. También encontraron que las prácticas conservacionistas evaluadas presentaron eficiencias promedio del 40 al 70% en el control del escurrimiento y la erosión del suelo, de tal manera que se pueden recomendar ampliamente para su aplicación en los sistemas de producción de cultivos en laderas con pendientes superiores al 15%.

Mancilla *et al.*, (2009) realizó el diseño de terrazas de banco para plantaciones forestales comerciales en Valle de Bravo, estado de México, evaluaron su eficiencia técnica y determinaron su factibilidad financiera, con una fase de campo entre enero y agosto de 2007. El diseño consistió en determinar los intervalos vertical y horizontal entre los bancales, con base en los criterios de precipitación, las pendientes dominantes en el terreno (15 y 30%), la textura del suelo y los requerimientos del silvicultor. Diseñaron 70 terrazas con 3 m de ancho por 0.45 m y 0.90 m de alto para las pendientes respectivas, en una superficie de 4 ha donde se plantaron 3 757 árboles comerciales. Para determinar la eficiencia técnica se midió la infiltración, el escurrimiento superficial y los sedimentos en lotes con y sin terrazas de 0.15 m², bajo lluvia simulada con una intensidad de 140 mm h⁻¹. La erosión del suelo se estimó con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. Las terrazas mostraron una eficiencia de 99.09% para reducir la erosión, 43.6% en aumentar la infiltración, 74% para reducir el escurrimiento superficial y 46.6% en la reducción de los sedimentos. La factibilidad financiera reportó una relación beneficio-costos de 2.37.

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación del suelo más adecuadas; por ello, es importante obtener datos confiables acerca del proceso y la velocidad a la que se está perdiendo el suelo, es por ello que de esta revisión se puede destacar la importancia del uso de modelos simplificados como la EUPS mediante los SIG, para estimar la pérdida de suelos a un costo relativamente bajo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se revisó la aplicabilidad del modelo SWAT en las cuencas de México para la estimación de erosión, haciendo una comparación de la pérdida de suelo estimada con la EUPS mediante un SIG y usando la técnica del álgebra de mapas. Se hizo énfasis en el cálculo del factor topográfico *LS* del SWAT y se propuso una alternativa de solución a esta limitante del modelo.

La Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en 2008, desarrollo para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) el proyecto “Caracterización y diagnóstico de la microcuenca Ixtapan del Oro, Estado de México”, el cual fue de gran ayuda para el desarrollo de esta investigación, ya que se aprovechó las imágenes de satélite, y recorridos de campo para la interpretación de las imágenes, el estudios de suelo, y la identificación de zonas con altas pendientes. Es por ello que la presente investigación se desarrollo en la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, ya que permitió disminuir los costos y hacerla posible, además de ser una cuenca con características físicas representativa de las cuencas de México.

En este capítulo se hace una descripción detallada del área de estudio, así como los materiales y los métodos empleados en la ejecución de la investigación.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca Ixtapan del Oro, se localiza en la parte noreste de la Región Hidrológica (RH) núm. 18 (Cuenca Media y Baja del Río Balsas) y pertenece a la Cuenca Hidrológica 18G Río Cutzamala; dentro del estado de México; se ubica en el poniente medio, entre las coordenadas 19° 14' 26.8'' y 19° 24' 15.8'' de latitud norte, y entre los 100° 10' 51.4'' y 100° 19' 20.9'' de longitud oeste, abarcando parte de cinco principales subcuencas a nivel de la república y con una superficie de 148.064 km².

En la Figura 4.1 se muestra la ubicación general de la cuenca Ixtapan a nivel de la República Mexicana, en tanto que el la Figura 4.2 se ubica a nivel de las principales subcuencas de la RH.



Figura 4.1. Localización de la cuenca Ixtapan del Oro, en la República Mexicana

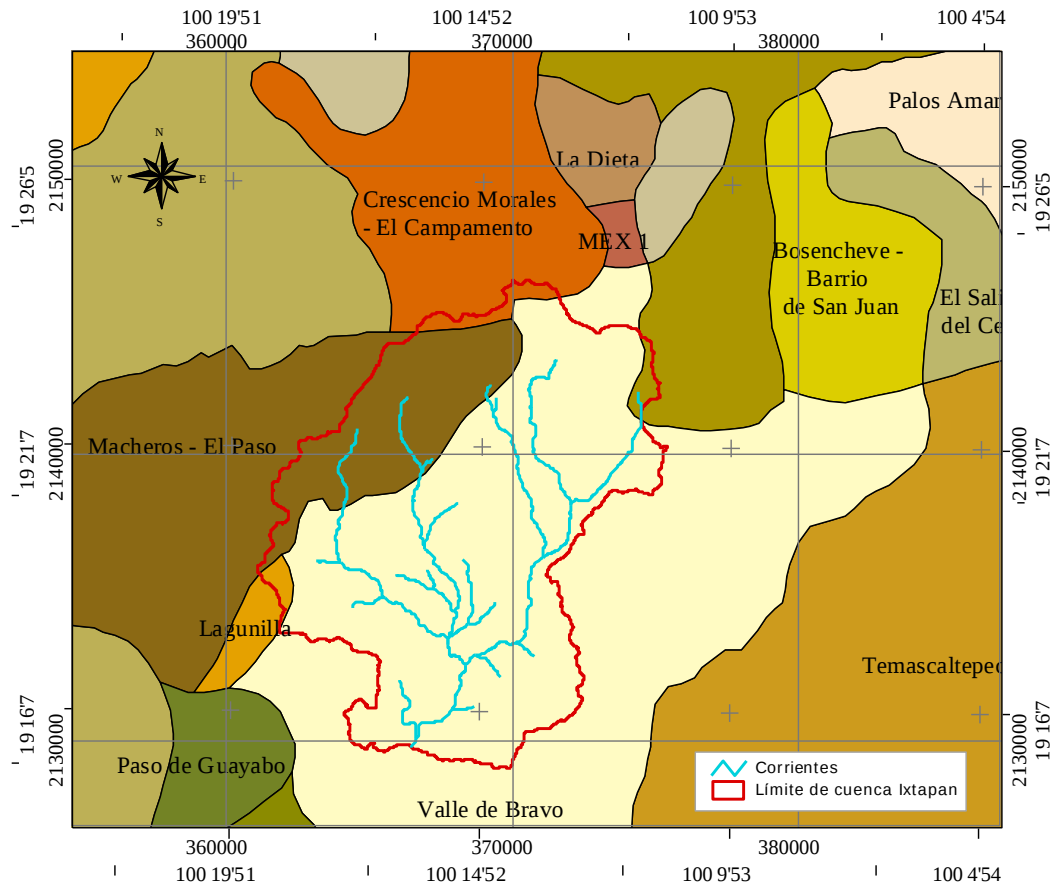


Figura 4.2. Ubicación de la cuenca Ixtapan del Oro en las principales subcuencas de la Región Hidrológica

4.1.2. División política

Los municipios que abarca la cuenca son principalmente del Estado de México, los cuales son: Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Villa de Allende, y Valle de Bravo; y por parte del Estado de Michoacán son: Zitácuaro y Susupuato. En la Figura 4.3 se ilustran los municipios mencionados, y en el Cuadro 4.1 se reportan la superficie que abarca cada municipio en la cuenca.

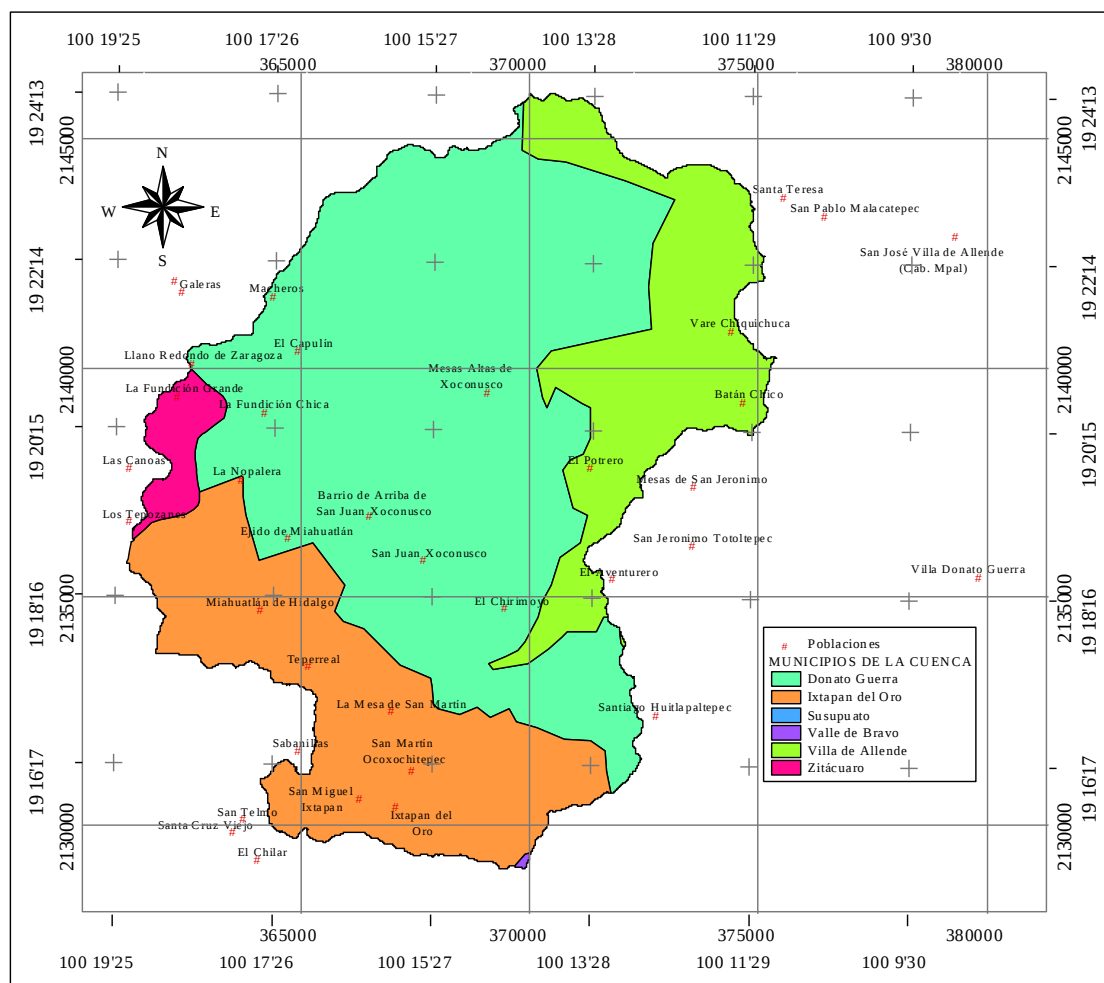


Figura 4.3. Municipios de la cuenca Ixtapan del Oro

Cuadro 4. 1 Distribución de la superficie en la cuenca Ixtapan por municipio

ESTADO	MUNICIPIO	ÁREA	
		ha	%
México	Donato Guerra	8429.037	56.93
México	Ixtapan del Oro	3465.176	23.40
México	Villa de Allende	2557.912	17.28
México	Valle de Bravo	5.959	0.04
Michoacán	Zitácuaro	343.694	2.32
Michoacán	Susupuato	4.623	0.03
TOTAL		14806.400	100.00

4.1.3. Fisiografía

Fisiográficamente, la región queda incluida dentro de la provincia del Eje Neovolcánico Transversal, que constituye una franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza la República Mexicana a la altura del paralelo 20. En este Eje se localiza un importante número de volcanes, y que constituyen las principales alturas del país, como son el Pico de Orizaba (5,650 m), Popocatepetl (5,450 m), Ixtaccíhuatl (5,280 m), Nevado de Toluca (4,560 m), la Malinche (4,460 m), Nevado de Colima (4,340 m) y Tancítaro, (4,160 m) (SEMARNAT, 2005).

El área de estudio se caracteriza por presentar un sistema montañoso con orientación noroeste-sureste, que divide las cuencas de los ríos Lerma y Balsas; algunas sierras que lo forman son, de oeste a este: Las Verduras, Tzitzio, Campanario, Chincua, Zinacantepec, San Andrés, Monte Alto y Monte Bajo. Este sistema no es continuo, la actividad tectónica y la erosión, han dado como resultado una división en sectores, por lo cual es posible encontrar dentro del sistema montañoso lomeríos, colinas, piedemonte, valles y planicies, (Mooser, 1996, citado por SEMARNAT, 2005)

La descripción particular del sistema montañoso de la cuenca Ixtapan del Oro, se describe a continuación.

La mayor parte del territorio municipal de Ixtapan del Oro está caracterizado por elevadas montañas y pequeñas planicies. Por corresponder al Sistema Xinantécatl, las rocas que predominan son: andesitas, malpaíses y conos con cráteres; al oeste

predominan calizas, pizarras arcillosas, granito y granodioritas, éstas dos últimas están relacionadas con la mineralización de algunas zonas.

El territorio de Donato Guerra, se ubica en la región conocida como sierra Mil Cumbres, que pertenece a la provincia de la sierra Volcánica Transversal o también conocido como Eje Neovolcánico, cerca del límite con la región de tierra caliente.

Los principales cerros son: el Cerro Pelón, de 3,040 metros sobre el nivel del mar, localizado en la región de Xoconusco y residencia de la mariposa monarca; otros más que se pueden mencionar son los Cerros de La Silla, localizado al oeste del Capulín, el Cerro de La Guacamaya, ubicado al este de Macheros, y el Cerro de La Cruz, localizado en la parte sur de Mesas Altas de Xoconusco.

Por otra parte Villa de Allende presenta dos conformaciones geográficas bien definidas: en primer término se tiene una zona baja de llanuras interrumpidas por pequeñas lomas y en segundo término una zona montañosa que se ubica al sur y poniente; siendo los cerros más importantes el Cerro del Pelón que se encuentra ubicado entre los municipios de Donato Guerra y Villa de Allende, conociéndole tradicionalmente como cerro del Zapatero; y al sur de Villa de Allende se encuentra el cerro denominado El Tabuce.

En la Figura 4.4 se muestran los principales cerros de la cuenca Ixtapan del Oro, así como los rangos de elevaciones.

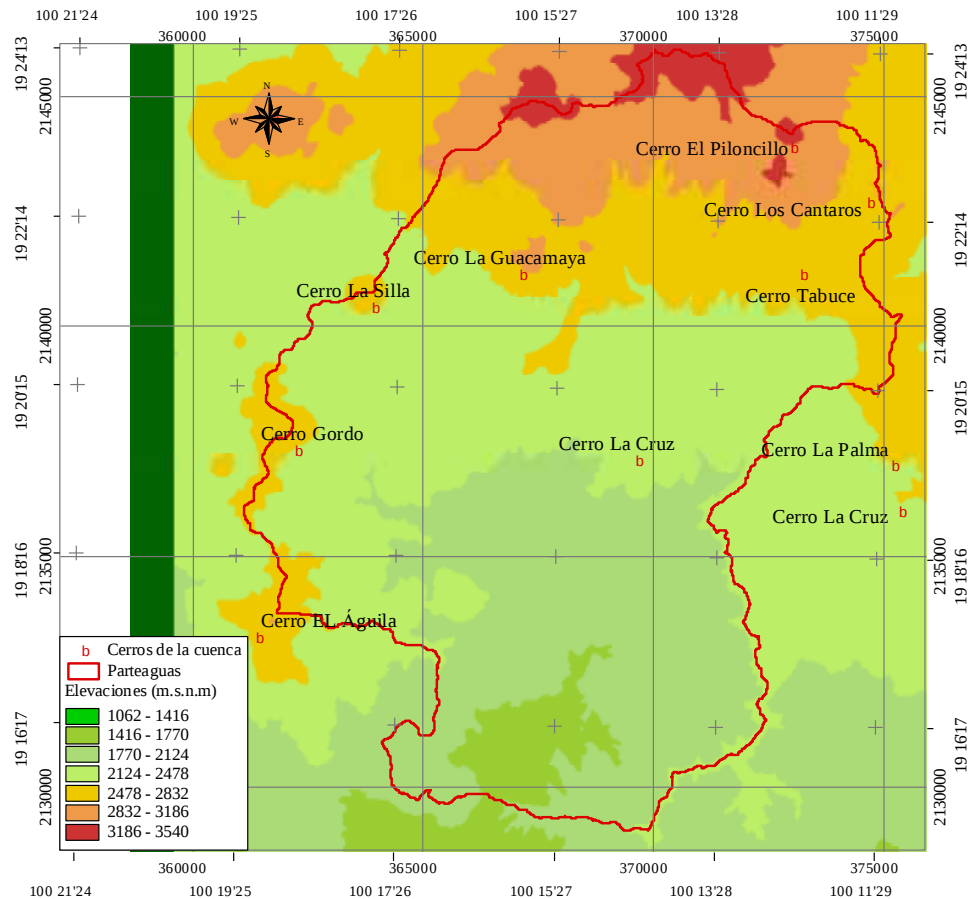


Figura 4.4. Principales cerros de la cuenca.
Fuente: INEGI, 1994a

4.1.4. Hidrografía

En la Cuenca Hidrológica 18G Río Cutzamala, hay 5,458 embalses siendo los más importantes: la Presa de Villa Victoria, Presa de Valle de Bravo, Presa El Bosque y Presa Chilesdo.

El Río Ixtapan del Oro se origina a unos ocho kilómetros al oeste de la cabecera municipal del municipio San José Villa de Allende, estado de México; desciende desde una altitud de 3,250 m por la vertiente sur del cerro Cacique con una dirección inicial

hacia el sur hasta la altura del poblado de San Juan Xoconosco, Méx., en donde cambia su rumbo hacia el sur-suroeste y más adelante, en las inmediaciones de Santiago Cuitlapaltepec, Méx., empieza a escurrir con una dirección franca hacia el suroeste; recibe por la margen derecha al Río Chiquito . A 600 m aguas abajo de esta confluencia se encuentran los restos de una estación hidrométrica que opero la Comisión Fedral de Electricidad (CFE) bajo el nombre de "Ixtapan de Oro". El Río corre en esta zona en forma encajonada y pasa por la población de Ixtapan de Oro, Méx., en donde se encuentra la presa derivadora Ixtapan; cruza al Canal de Conducción Bosque-Colorines y vuelve a correr con rumbo sur hasta su confluencia al Río Tilóstoc por la margen derecha de éste a tres kilómetros al oeste - suroeste de Santo Tomás Nuevo, estado de México. El Río Ixtapan del Oro tiene un desarrollo de aproximadamente 30 kilómetros (IMTA, 1999).

4.1.5. Suelos y vegetación

De acuerdo con la clasificación utilizada en forma convencional en México, de la FAO/UNESCO, en la mayor parte de la cuenca se presentan los andosoles, y en una menor proporción los litosoles y acrisoles, reportados en la Figura 4.5.

La SEMARNAT, (2005) reporta que los andosoles se sitúan sobre rocas volcánicas efusivas vítreas, como lavas, escorias y cenizas; son suelos de alteración bioquímica predominante, de ciclo corto, característicos de zonas bien drenadas con clima templado y frío sin un periodo seco acusado, principalmente de las montañas húmedas, donde la materia orgánica que se descompone lentamente, tiende a acumularse y a favorecer un

fuerte arrastre de las bases, lo que provoca una marcada acidificación. Se trata de suelos con perfil poco diferenciado, de tipo AC, o de apariencia AC, pudiendo tener el horizonte A1 mucho espesor. Estos suelos tienen valores muy elevados de porosidad, permeabilidad, capacidad de retención del agua (100%) y capacidad de intercambio catiónico (50 a 100 meq/100g).

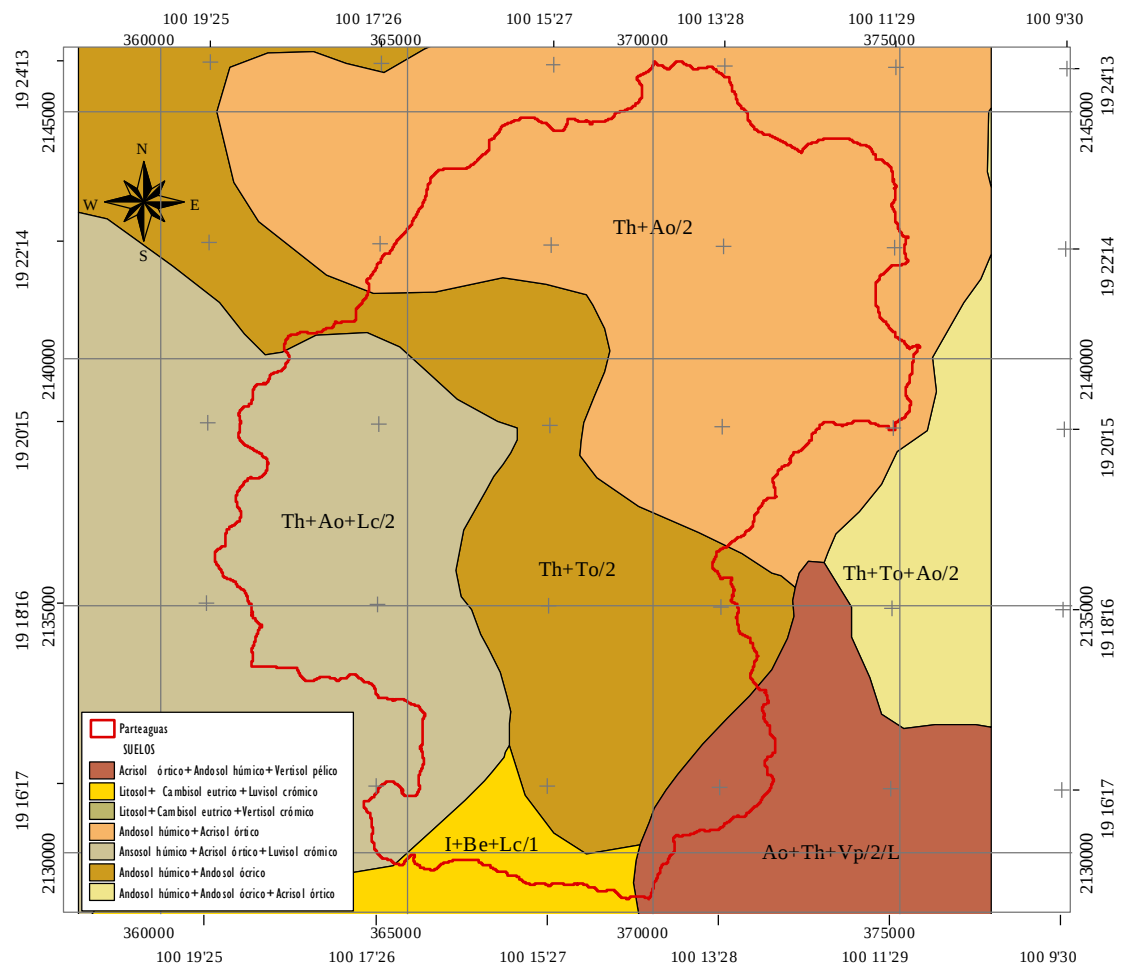


Figura 4.5. Tipos de suelo en la cuenca
Fuente: INEGI ,1994c

Los andosoles de las montañas húmedas se comportan son aptos para bosques y para pastos, sobre todo los menos ácidos. Desde el punto de vista químico, la nutrición en fósforo y nitrógeno no siempre está asegurada, principalmente en los andosoles ácidos, debido a la insolubilización parcial del fósforo por los alófanos y a la nitrificación que es muy lenta (Duchaufour, 1987, citado por SEMARNAT, 2005).

La cuenca Ixtapan del Oro de estudio se localiza dentro de la provincia florística “Serranías Meridionales” de la región florística “Mesoamericana de Montaña”, en la cual participan elementos tanto del Reino Holártico como del Neotropical en proporciones similares, lo que hace muy difícil su inclusión dentro de alguno de ellos. Los tipos de vegetación predominante se encuentran en estrecha relación con las características particulares de cada entorno, destacando la importancia del clima y de las condiciones edáficas (SEMARNAT, 2005).

Por toda la región existen grandes masas de bosques mixtos de pino-encino, asociados a los andosoles, sobre todo a partir de los 2,200 msnm y hasta los 3,000 msnm. Estos bosques están formados por una mezcla de los géneros *Pinus* y *Quercus* en proporción diversa, siendo difícil separar un componente de otro debido a la heterogeneidad con que se presentan. En menor medida, se localizan bosques de encino (*Quercus sp*), asociados a las zonas de transición hacia climas más cálidos y a las de mayor impacto humano. Esto mismo ocurre con las unidades de matorrales. El resto de la región está cubierta por cultivos, sobre todo de cereales, además de una creciente utilización del suelo para plantaciones frutícolas, y en menor medida de pastos para el ganado. En las partes altas

de las montañas, en las áreas de hibernación de la mariposa monarca, se encuentran presentes los bosques de pino y pino-encino, así como otros tipos de asociaciones vegetales. El bosque aciculifolio se encuentra distribuido sobre los 3,000 msnm y en él predominan los abetos u oyameles (*Abies religiosa*), con una fuerte presencia de pinos, que se presentan como manchones dentro del bosque de oyamel. Se pueden identificar fácilmente cuatro estratos; el más alto (con 30 m de altura, aprox.), está constituido exclusivamente por el Oyamel; el segundo estrato (de aprox. 8 m. de altura), constituido por oyamel asociado con pinos, mientras que el más bajo (4 – 8 m de altura), presenta pinos y encinos (SEMARNAT, 2005).

4.1.6. Clima

En la cuenca se presentan dos tipos de clima: Clima Templado en las provincias geográficas de la Sierra de Mil Cumbres y el Clima Tropical Seco, hacia el sur de la región, en la unidad fisiográfica conocida como Depresión del Balsas.

El clima predominante de la región es el templado húmedo con lluvias en verano (Cw), así como clima templado húmedo con lluvias todo el año en las partes más altas. Hacia la parte oriental, de menor altitud, el clima es semicálido con lluvias en verano (García ,1987).

Siguiendo la caracterización climática que hace García (1987), a partir de modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen y de acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y sus inmediaciones, los

climas templados húmedos, de la región, se caracterizan por tener una temperatura media del mes más frío (diciembre o enero) de entre 9 y 15 °C y la del mes más caliente (abril o mayo) superior a 14 °C, y se ajustan a la regla que indica que la precipitación del mes más húmedo de la mitad caliente del año (julio o agosto) sea por lo menos 10 veces mayor que la del mes más seco, la cual tiene que ser menor de 40 mm. Estos climas se localizan en la parte norte y este, por encima de los 2,200 m de altitud, así como en la ciudad de Zitácuaro, a 1,900 m pero muy cercana a importantes masas forestales. Hacia el sur de la cuenca definida para este trabajo, correspondiente a la Depresión del Balsas predomina el clima clasificado como semicálido, del cual se encuentran dos tipos, el A(C), que se caracteriza por una temperatura media anual de entre 18 y 22 °C y la del mes más frío mayor de 18 °C; y el (A)C, de temperatura media anual mayor de 18 °C y temperatura media del mes más frío de entre 14 y 17 °C, donde la temperatura del mes más caliente es mayor de 20 °C.

La precipitación media anual en la cuenca estimada mediante polígonos de Thiessen es de 906.5 mm; el Cuadro 4.2 contiene el área de influencia de cada estación, así como su precipitación media anual, y en la Figura 4.6 se ilustra el comportamiento de la precipitación, evaporación y temperaturas a lo largo del año.

Cuadro 4.2. Precipitación media anual en las estaciones

Estación		P anual	Área de influencia	
Clave	Nombre	mm	km ²	%
15035	Ixtapan del Oro	918.47	110.198	74.4
15108	Santa María del Monte	831.47	17.627	11.9
15197	Cuesta del Carmen	905.91	15.411	10.4
16036	El Bosque	910.39	4.827	3.3
TOTAL			148.064	100.0
Precipitación media en la cuenca		906.5 mm		

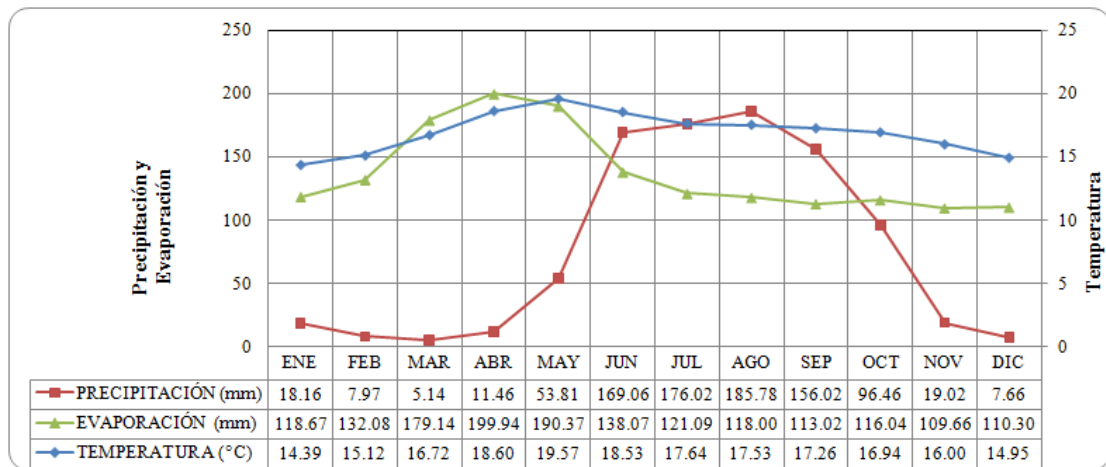


Figura 4.6. Comportamiento de la precipitación, evaporación y temperatura

4.2. MATERIALES UTILIZADOS

4.2.1. Material cartográfico

El material cartográfico que se utilizó del Instituto de Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) para la realización de este trabajo fue el siguiente:

- Carta topográfica E14A36 Villa de Allende, escala 1:50 000 en digital tanto en formato raster como en vectoriales, INEGI (1994a).
- Ortofotos E14A36a, E14A36b, E14A36d y E14A36e con resolución espacial de pixel de 2 m, INEGI (1994b).

4.2.2. Modelo digital de elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se obtuvo del sitio electrónico del INEGI el cual tiene una resolución de pixel de 30 m; en la Figura 4.7 se presenta el MDE empleado en este trabajo.

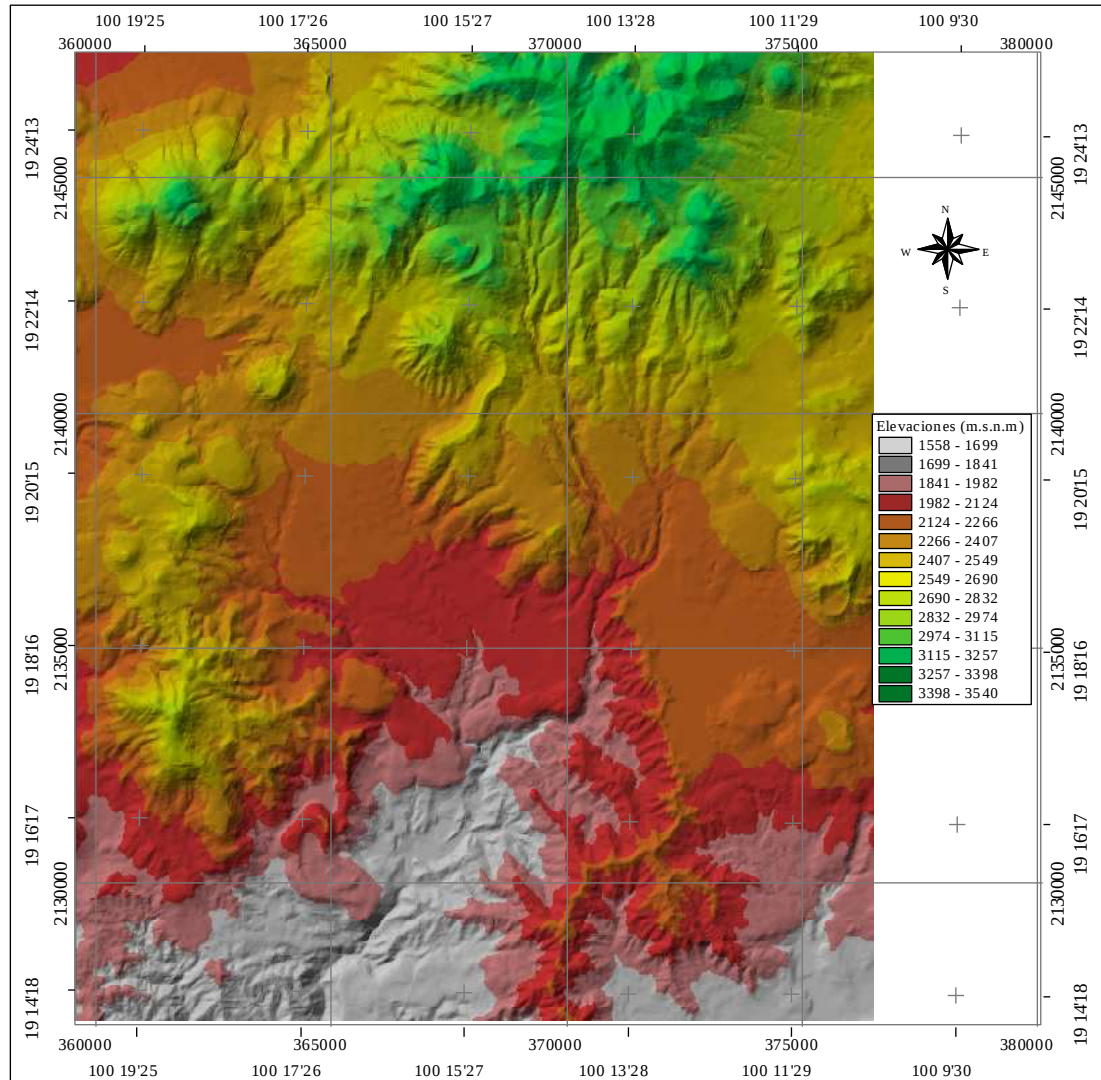


Figura 4.7. Modelo digital de elevaciones

4.2.3. Programas de cómputo

Los programas de cómputo que se emplearon como herramienta para el desarrollo del presente trabajo son los que se enlistan a continuación:

- ArcView 3.2
- Extension Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para ArcView 3.x
- Idrisi Andes

- La extensión Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio (SEDEOT 1.00) para ArcView 3.x, creada por González (2003), bajo la metodología para el índice de erosión hídrica de Figueroa, *et al.*, (1991).
- ArcGis 9.3
- Office 2007

4.2.4. Bases de datos

Dentro de las bases de datos que se emplearon para obtener información climatológica están:

- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) publicado en 2006
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del IMTA (1999)
- La base de datos climática nacional (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con información recopilada al año 2008.

4.2.5. Imágenes de satélite

Las dos imágenes satelitales que se emplearon para la caracterización de los usos del suelo, fueron tomadas por el Sensor SPOT 5 para enero de 2004, las cuales se describen en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Imágenes del satélite Spot 5 empleadas

DENOMINACIÓN	FECHA DE ADQUISICIÓN	RESOLUCIÓN ESPACIAL	DATUM-ELIPSOIDE	PROYECCIÓN	COLUMNAS/HILERAS
586-312	12 de enero de 2004	10 m x 10 m	WGS84	UTM14	8995 / 7773
586-311	09 de enero de 2004	10 m x 10 m	WGS84	UTM14	9035 / 7761

4.3. MÉTODOS

4.3.1. Estaciones climatológicas

El modelo SWAT requiere de datos diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, por lo que es necesario seleccionar estaciones con el mayor registro de datos.

Se seleccionaron las cuatro estaciones más cercanas a la cuenca y que se describen en el Cuadro 4.4. El registro de datos empleados fue del periodo de 1974-1986, que fue el periodo más reciente y con un rango relativamente amplio en el registro de los datos de precipitación y temperaturas, y aun así hubo algunos datos faltantes, los cuales fueron generados mediante SWAT estocásticamente, obteniendo los valores de precipitación y temperatura más probables.

Cuadro 4.4. Estaciones meteorológicas consideradas

ESTACIÓN METEOROLÓGICA		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS UTM	
CLAVE	NOMBRE	Longitud	Latitud	X	Y
15035	Ixtapan del Oro	100° 16'	19° 16'	366,888.738	2,130,819.516
15108	Santa María del Monte	100° 08'	19° 19'	380,938.139	2,136,256.076
15197	Cuesta del Carmen	100° 12'	19° 28'	374,049.174	2,152,903.996
16036	El Bosque	100° 23'	19° 23'	354,729.880	2,143,825.425

4.3.2. Información del suelo

La información del suelo se obtuvo del INEGI y mediante muestreo en campo y posteriormente su análisis en laboratorio para obtener sus texturas y contenido de materia orgánica, y de esta forma estimar el factor de erosionabilidad del suelo (factor K). En la Figura 4.8 se muestra la distribución y los 31 puntos de muestreo en la cuenca, y en Figura 4.9 se ilustran imágenes del muestreo de suelo en campo; en el Cuadro 4.5 se reportan los valores de K para cada clase del suelo, los cuales se obtuvieron del Cuadro 3.10, en base a los contenidos de materia orgánica y clase textural.

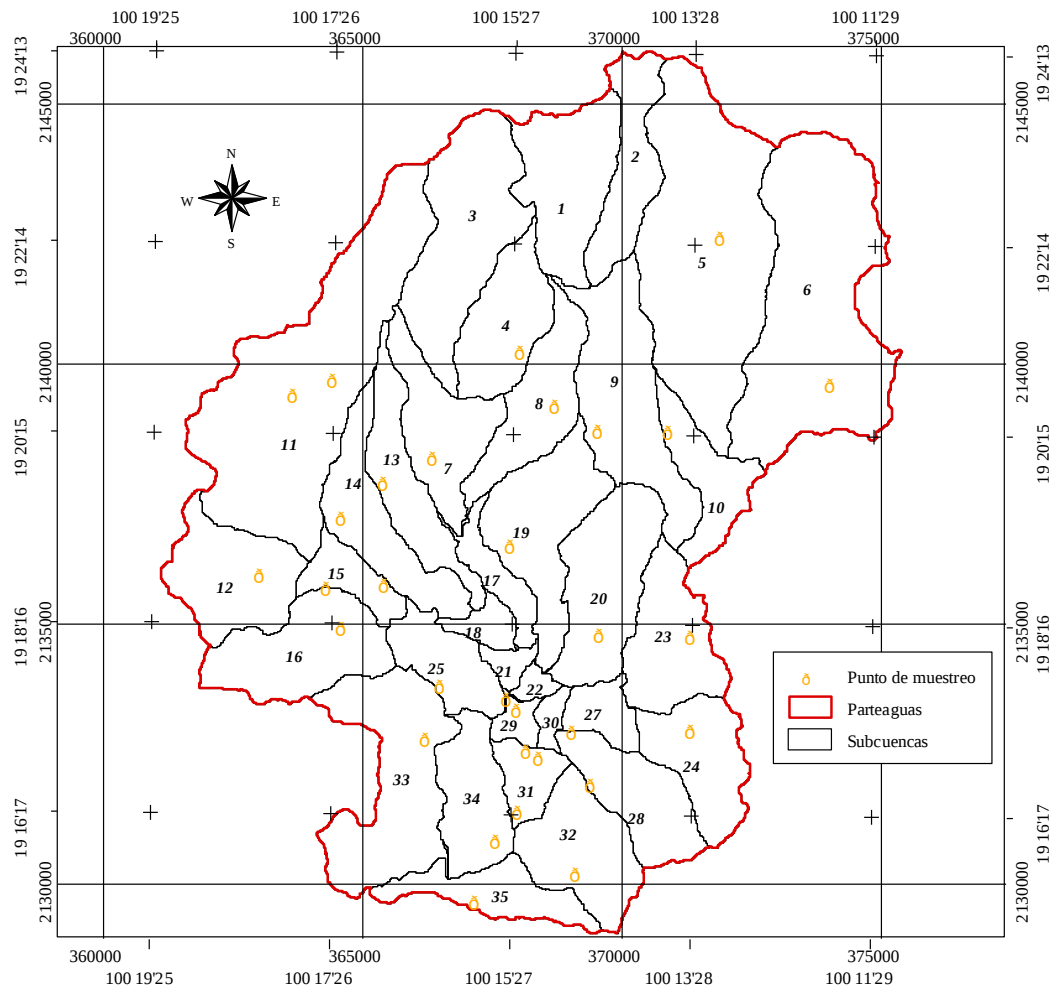


Figura 4.8. Puntos de muestreo en la cuenca



Figura 4.9. Muestreo de los suelos de la cuenca

Cuadro 4.5. Grupos de suelo de la cuenca

SUELO	CLAVE	CLASE	TEXTURA	K	
				[t ha mm/(ha MJ h)]	t ha mm/(m ³ t cm)]
S1IXT	Th+To/2	Andosol húmico+Andosol ócrico	Franco arenoso	0.02	0.154
S2IXT	Th+Ao/2	Andosol húmico+Acrisol órtico	Franco	0.03	0.230
S3IXT	Th+Ao+Lc/2	Andosol húmico+Acrisol órtico+Luvisol crómico	Franco	0.03	0.230
S4IXT	Ao+Th+Vp/2/L	Acrisol órtico+Andosol húmico+Vertisol pélico	Franco arenoso	0.02	0.154
S5IXT	I+Be+Lc/1	Litosol+Cambisol eutrítico+Luvisol crómico	Franco arcilloso	0.02	0.154

Como se puede observar en el Cuadro 4.5 se reportan dos columnas del factor de erosionabilidad con unidades diferentes, esto se debe a que en el cálculo de la erosión mediante el álgebra de mapas, las unidades de los valor de K deben ser $[t\ ha\ mm/(ha\ MJ\ h)]$ y, cuando se usa el modelo SWAT los valores se deben introducir con las siguientes unidades: $[t\ ha\ mm/(m^3\ t\ cm)]$, para ello los valores del K en el álgebra de mapas deben ser divididos entre 0.13 y de esta forma obtener los valores tal como los requiere SWAT.

4.3.3. Procesamiento de las imágenes de satélite

Para la determinación del uso del suelo de la cuenca, se emplearon las imágenes enunciadas en el Cuadro 4.3 y su procesamiento, se realizó con el software Idrisi Andes, en el que se generó mosaicos de las dos imágenes y las composiciones correspondientes para una mejor interpretación, usando la técnica de clasificación supervisada, obteniendo la capa en formato raster de los usos del suelo. En la Figura 4.10 se muestra la composición de las imágenes en Idrisi, así como la identificación de áreas de entrenamiento en campo y la capa raster de los usos del suelo. Las áreas de entrenamiento se definieron ubicando polígonos de sitios con cobertura vegetal bien definidos en campo y posteriormente indicándoselos al software al momento de hacer el procesamiento de las imágenes.

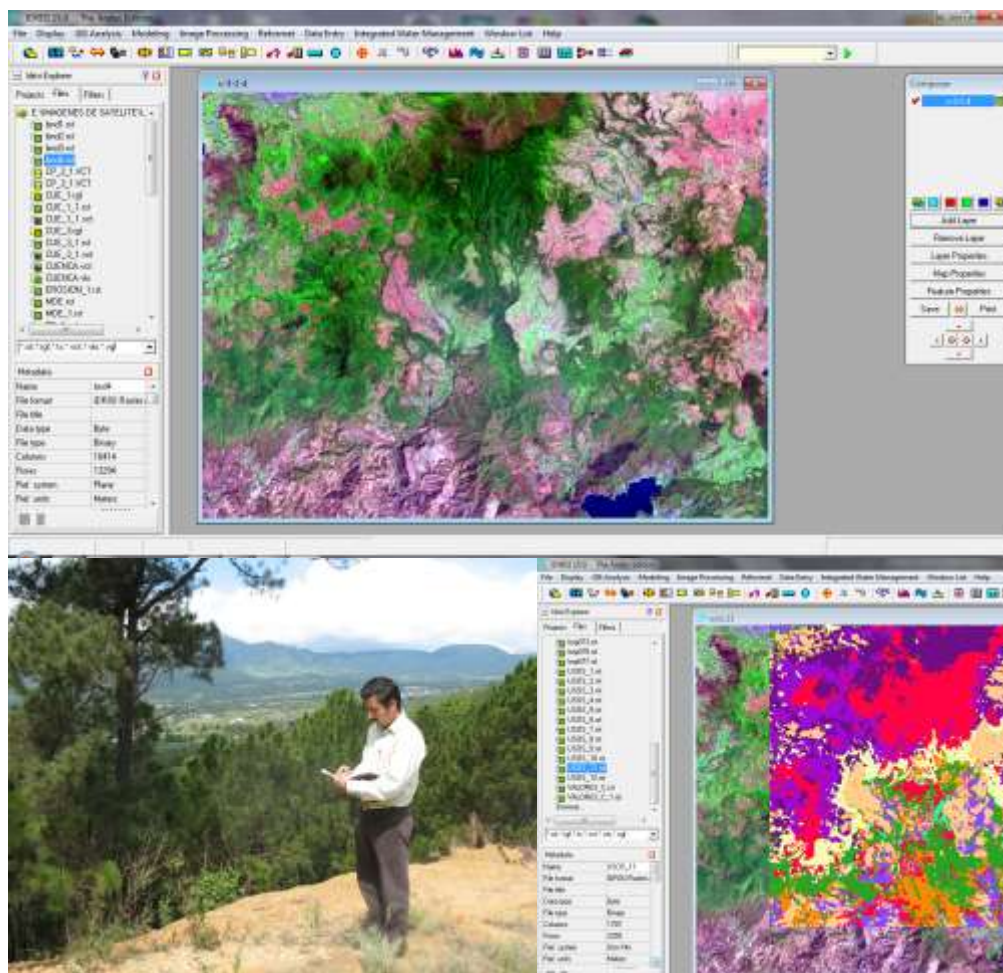


Figura 4.10. Mosaico de las imágenes y definición de áreas de entrenamiento

4.3.4. Clases de uso del suelo

El Archivo raster que se obtuvo del uso del suelo mediante Idrisi, fue exportado al ArcView, donde se le conformó como un archivo en formato grid, que se utilizó para asignar los valores del factor de cobertura vegetal C en el álgebra de mapas y en el modelo SWAT. Las nueve clases de uso del suelo que se obtuvieron así como su superficie y valores de C correspondientes se muestran en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Clases de uso del suelo

ID	USO DEL SUELO	CLAVE	CLAVE SWAT	ÁREA		FACTOR C
				ha	%	
1	Bosque de Pino	BDP	PINE	4,657.310	31.5	0.001
2	Bosque de Cedro	BDC	FRSE	1,610.800	10.9	0.001
3	Bosque de Encino	BDQ	FRSD	2,179.890	14.7	0.001
4	Bosque de Pino-Encino	BPQ	FRST	1,134.230	7.7	0.007
5	Bosque de Pino-Cedro	BPC	FRST	1,568.510	10.6	0.007
6	Vegetación Arbustiva	VGA	RNGB	221.750	1.5	0.077
7	Agricultura	AGR	AGRL	1,960.460	13.2	0.375
8	Zona Urbana	URB	URLD	590.300	4.0	0.000
9	Pastizal	PAZ	RNGE	883.120	6.0	0.015
	TOTAL			14,806.370	100.0	

4.3.5. Delimitación de la cuenca y alimentación del modelo SWAT

La delimitación de la cuenca se realizó utilizando el modelo SWAT tomando, como base el MDE, y definiéndose el punto de salida de la cuenca en las coordenadas UTM (366 470.0, 2 129 790.0); que corresponden posteriormente se introdujo la demás información requerida por el modelo en el orden que se describe a continuación:

- A. Se colocaron los archivos que contienen la información climatológica (temperaturas y precipitaciones) en la dirección requerida por el modelo.
- B. Se introdujo el mapa de uso del suelo en formato grid y se le asignó las clases de uso del suelo que se encuentran registradas en el modelo; para aquellos usos del suelo que no existían en la base de datos del modelo, se dieron de alta en el archivo crop.dbf o desde la interface el SWAT.

C. Se insertó el mapa que contiene los grupos de suelo en formato grid, y se le asignó sus propiedades de acuerdo a los grupos de suelo contenidos en el modelo, los cuales fueron dados de alta previamente en la base de datos usersoil.dbf. En la Figura 4.11 se muestra la pantalla en la que se activaron los usos y tipos de suelo.

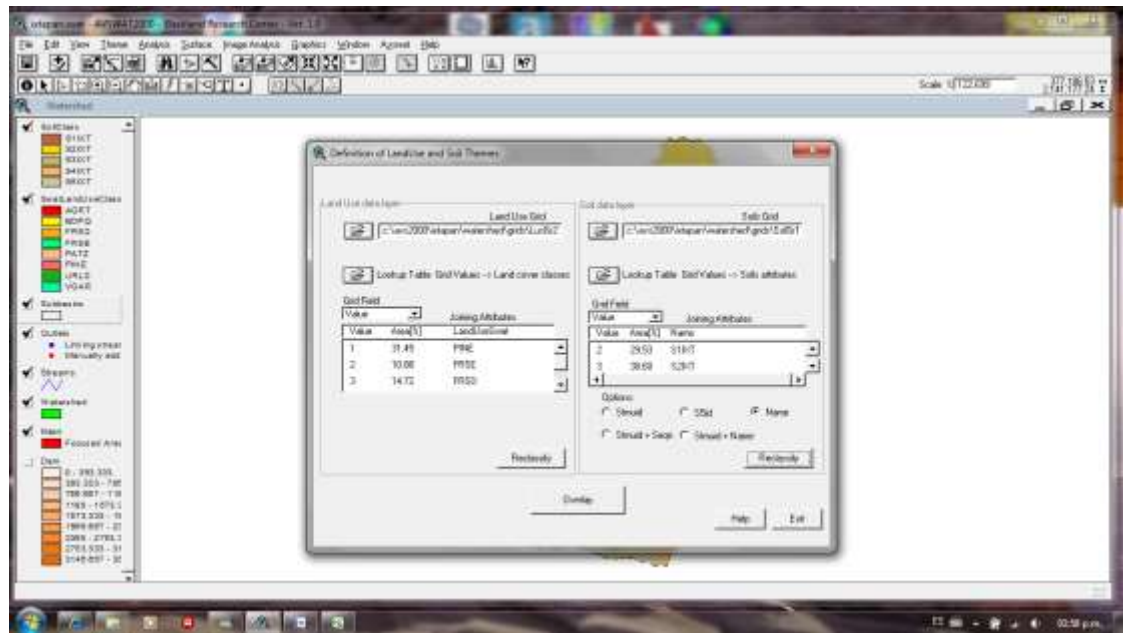


Figura 4.11. Activación de los usos y tipos de suelo

D. Se definieron las URH, seleccionando la opción de múltiples ya que ésta permitió tener mejor detalle de cálculo que la opción de URH dominante. En la opción de URH múltiples se asignó un 20% al uso del suelo por área de subcuenca y 10% a la clase del suelo por área de uso del suelo; atendiendo a las recomendaciones del User' Guide (Di Luzio, 2002). (Figura 4.12.)

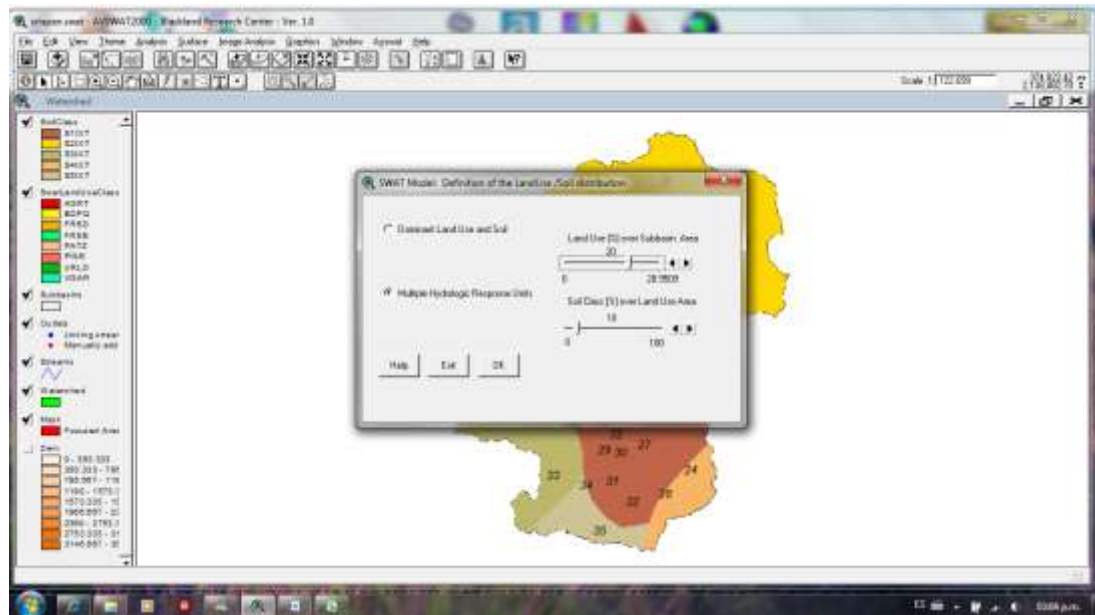


Figura 4.12. Definición de las unidades de respuesta hidrológica

E. Desde la interface ArcView SWAT se cargaron los datos de las estaciones climatológicas, tal como se muestran en la Figura 4.13.

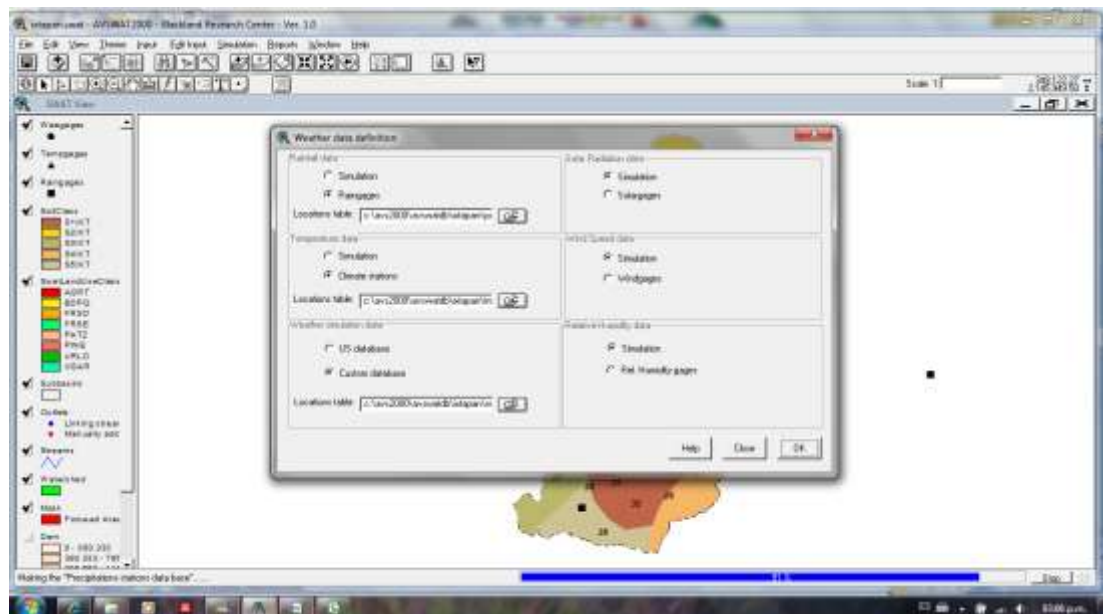


Figura 4.13. Activación de los archivos que contiene la información climatológica

F. El modelo SWAT verificó que la información proporcionada estuviera en el formato correspondiente y generó archivos internos para proceder a correr el modelo, al que se le indicó realizara los cálculos los realizara a nivel anual, en la ventana que se muestra en la Figura 4.14.

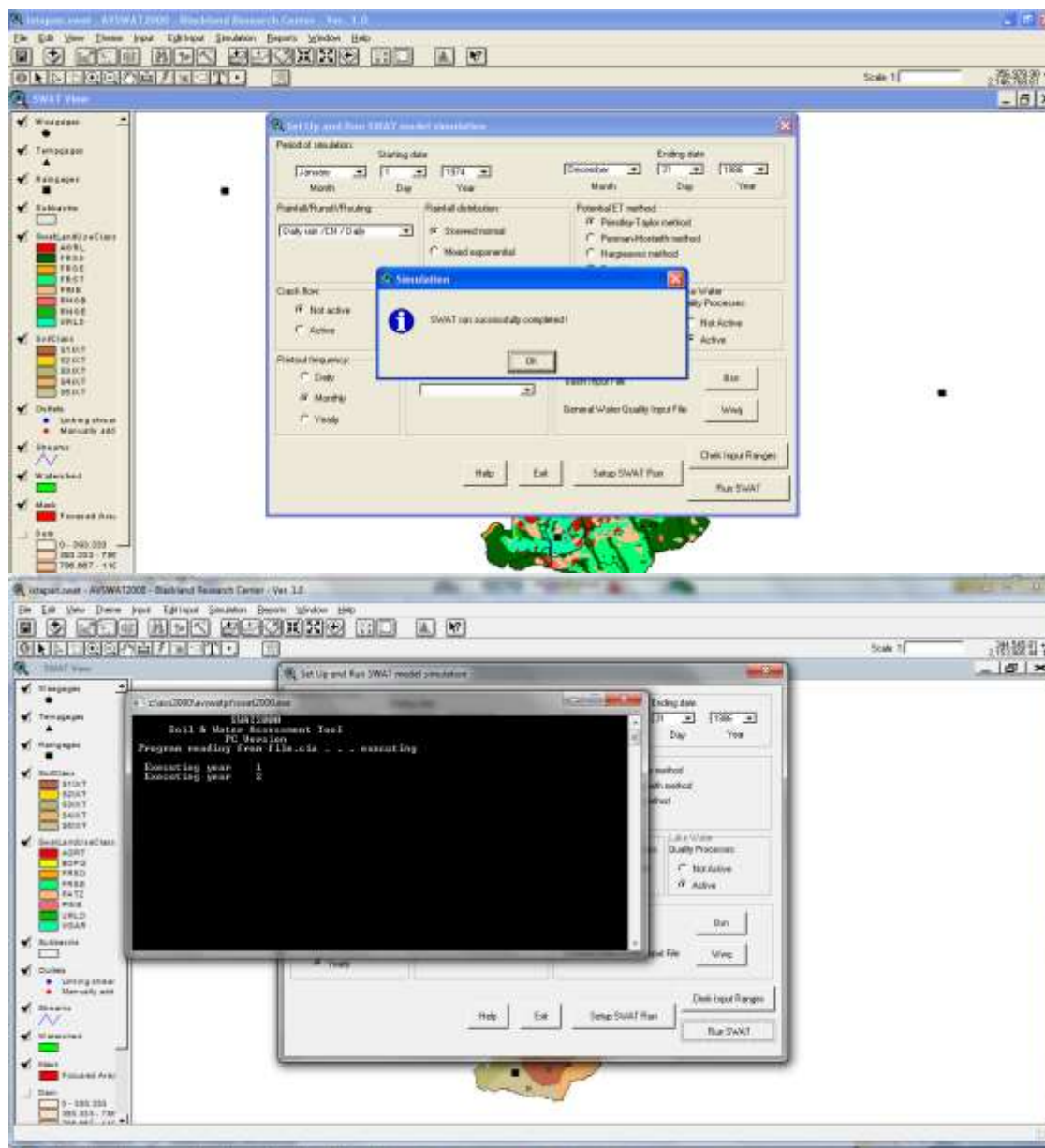


Figura 4.14. Corrida del modelo SWAT

4.3.6. Obtención de los principales parámetros físicos de la cuenca

Los principales parámetros físicos de la cuenca se obtuvieron con el software Idrisi Andes a través del módulo **Integrated Water Management** y su extensión **Water Cycle** creados en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) por Franco (2008). En la Figura 4.15 se muestran este módulo y la definición de los parámetros.

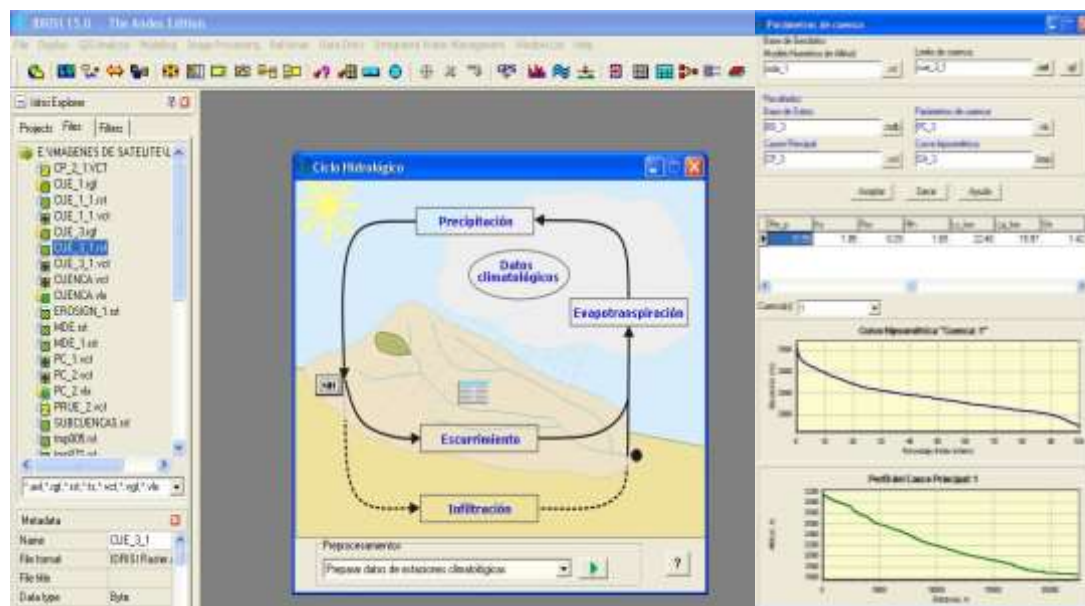


Figura 4.15. Estimación de los parámetros físicos de la cuenca en la extensión Water Cycle del Idrisi

4.3.7. Estimación de la erosión mediante álgebra de mapas

El cálculo de la erosión mediante el álgebra de mapas se realizó aplicando los principios teóricos descritos en el Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión de Figueroa, *et al.* (1991) y haciendo uso de las herramientas computacionales en el software ArcView y su comando Map Calculator, multiplicando cada uno de los mapas de los factores de la EUPS, como se muestra en el esquema de la Figura 4.16.

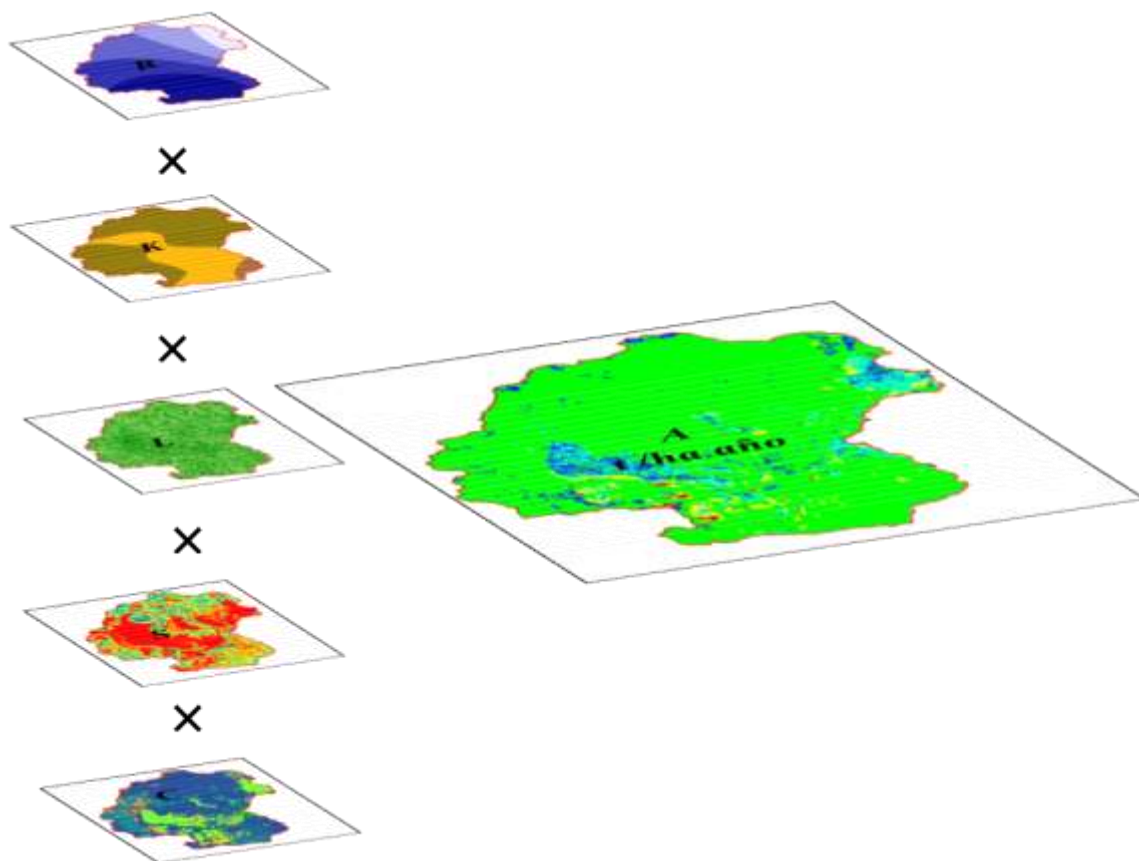


Figura 4.16. Esquema que muestra la aplicación del álgebra de mapas para el cálculo de la pérdida de suelo en la cuenca aplicando la EUPS

Para la estimación de la erosividad de la lluvia, se empleó la ecuación (4.1) de la metodología de Cortés (1991), en tanto que SWAT estimó la erosividad mediante el índice EI_{30} , ya que no cuenta con un campo en el que se le pueda indicar libremente el valor de R .

$$R = 3.4880P - 0.000188P^2 \quad (4.1)$$

El factor topográfico se obtuvo con ayuda de la extensión SEDEOT para el álgebra de mapas a partir del MDE; SWAT por su parte lo estima internamente.

4.3.8. Estimación de la erosión con SWAT y corrección del factor topográfico LS

SWAT estimó la erosión hídrica con la EUPS y la EUPSM, se realizaron dos corridas del modelo, en la primeras se obtuvieron los valores de erosión con los valores que da por defecto el programa, y en la segunda corrida se modificaron los valores de la longitud de la pendiente y que se describen en el apartado 5.5, y apoyándose de User's Manual de Neitsch *et al.*, (2002b), para la interpretación de las variables.

De los valores de erosión que resultaron del álgebra de mapas, se obtuvo con ArcGis 9.3 el valor medio de erosión por subcuenca, y poder compararlo con SWAT, ya que este reporta los valores por URH y subcuencas.

Una vez que se obtuvieron los resultados de la corrida del SWAT y del álgebra de mapas en ArcView, se compararon los resultados de erosión y, sobre todo, se hizo una comparación del factor topográfico, modificando en particular la longitud de la pendiente (L_h), que en la mayoría de la literatura la denominan con la letra griega λ .

Dado que el mapa de LS que se obtuvo del SEDEOT, fue un mapa con valores puntuales por pixel, y para poder comparar dichos valores con los obtenidos de SWAT se tuvo que definir un valor promedio de LS por subcuenca, esto se realizó con ayuda del ArcGis 9.3.

El valor de L_h se puede modificar en el menú Edit Input, y submenú Subbasins data de SWAT que se muestra en la Figura 4.17; sin embargo, en dicho menú sólo pueden ser

corregidos los valores de L_h que están entre 10 y 150, cuando L_h es menor de 10, entonces el cambio se debe realizar en la tablas de atributos del archivo que SWAT nombra por default como “subbasins.shp”, en el campo “ Sll ”, que es donde se realizó la correcciones para los valores de L_h para este trabajo; los nuevos valores que se introdujeron, se obtuvieron mediante un despeje de la ecuación (3.15), tomando como base el valor de LS obtenido de la extensión SEDEOT; el ángulo de la pendiente se retomó del archivo “subbasins.shp”, ya que en este se guardan datos como: área, pendiente media, longitud de pendiente, elevación media, entre otros (ver Figura 4.18).

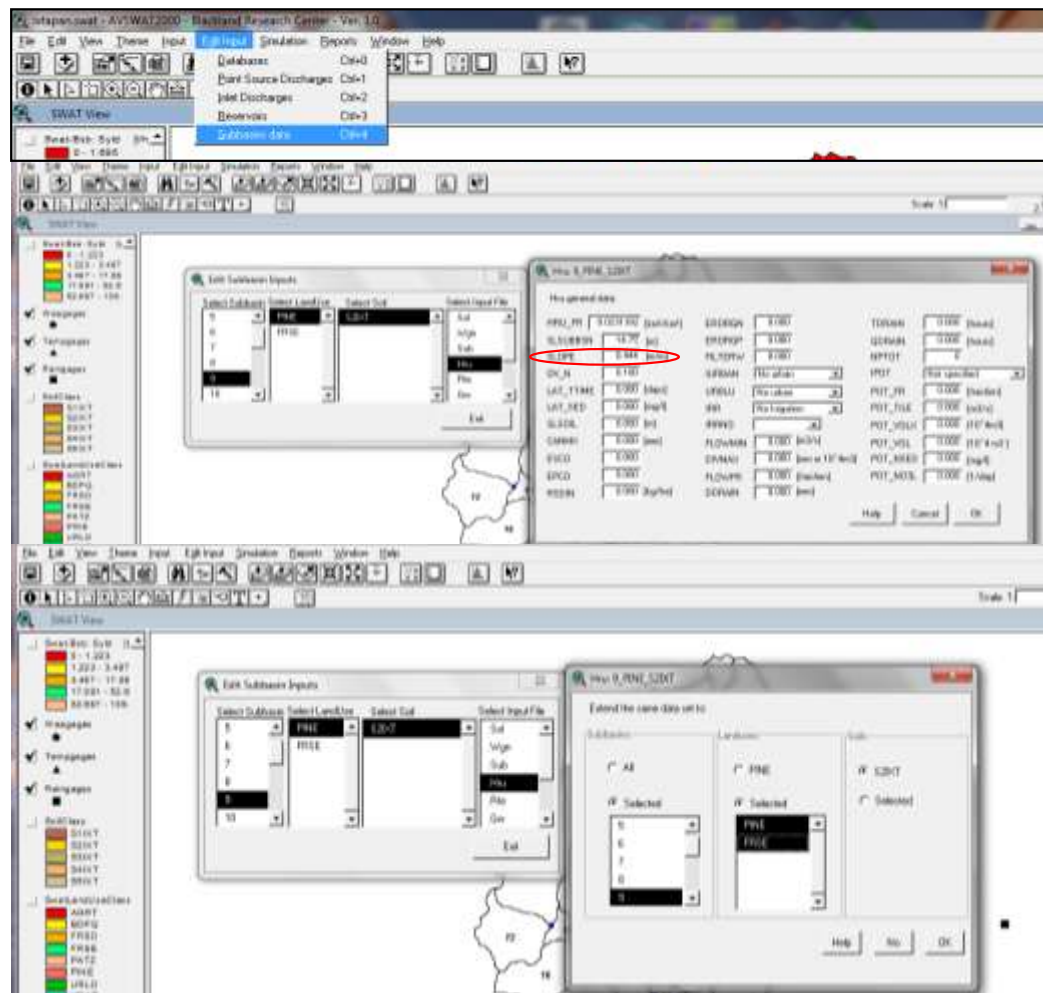


Figura 4.17. Modificación de la longitud de la pendiente

Shape	ID	Elevation	Area	Length	Slope	Flow	Sediment	Flow	Sediment	Flow	Sediment	
Polygon	5	1	1	585.0700	485.5107	44.4485	5.4150	13.6444	2.4124	0.2407	18.360236	2001.00
Polygon	2	2	2	242.5700	5571.7800	45.7080	5.0330	19.5208	2.7089	0.2527	18.382560	2002.00
Polygon	7	3	3	788.7300	7628.1231	42.4286	5.6919	18.0772	4.1771	0.2445	18.368440	2006.00
Polygon	8	4	4	289.7700	5304.9947	46.1279	6.1930	17.6440	3.9779	0.2349	18.360330	2004.00
Polygon	9	5	5	1240.4200	10294.6868	39.8081	5.0779	12.4290	6.3475	0.2620	18.360444	2046.00
Polygon	10	6	6	1246.0000	9639.0817	27.3585	0.0030	11.0685	6.1780	0.3679	18.360357	2003.00
Polygon	14	7	7	485.6900	6057.6209	21.9947	9.0919	4.7677	2.8697	0.2272	18.374638	2050.00
Polygon	15	8	8	384.2400	6057.2707	25.2085	7.5369	11.5272	2.8380	0.2258	18.342557	2488.00
Polygon	16	9	9	660.2700	7552.4522	32.8173	6.6419	19.0390	4.8033	0.2768	18.343302	2387.00
Polygon	19	10	10	287.6300	4836.5345	19.7082	10.8619	8.6613	2.4385	0.1963	18.379758	2238.00
Polygon	17	11	11	1452.8500	10379.3200	27.8502	0.2944	18.1888	6.4279	0.2953	18.348016	2254.00
Polygon	24	12	12	445.8700	2048.0703	36.8321	0.2219	11.0672	3.2467	0.2405	18.313709	2296.00
Polygon	20	13	13	345.2700	7123.7693	7.2087	14.0458	5.9462	2.7273	0.2141	18.391902	2219.00
Polygon	21	14	14	489.2300	6574.6292	4.6185	14.5070	5.0668	2.8044	0.2204	18.327044	2181.00
Polygon	22	15	15	166.9600	3189.3338	24.1130	0.9489	9.0536	1.7545	0.1936	18.313405	2137.00
Polygon	28	16	16	626.0900	4769.5752	20.5144	6.2138	14.2004	1.4532	0.2508	18.360562	2204.00
Polygon	26	17	17	152.6700	4105.7130	14.8425	12.7314	4.9236	1.4769	0.1527	18.310555	2045.00
Polygon	27	18	18	80.2200	2580.7816	12.1280	13.3479	5.0779	1.1585	0.1236	18.305437	2041.00
Polygon	33	19	19	503.8000	6144.5118	22.1089	9.7860	7.8863	3.6200	0.2540	18.318777	2119.00
Polygon	35	20	20	635.8600	5622.0425	21.3681	10.2700	8.4449	3.5459	0.2650	18.311951	2017.00
Polygon	36	21	21	517.0000	3051.1890	23.2242	8.1450	11.0280	6.3275	0.1839	18.289712	1946.00
Polygon	37	22	22	42.2700	3294.2652	23.6662	9.5938	18.3645	0.7696	0.0817	18.284776	1926.00
Polygon	40	23	23	426.8700	4258.3702	34.5646	6.6264	6.5046	3.8600	0.2323	18.354442	2075.00
Polygon	40	24	24	380.3500	2614.7104	34.2675	6.5444	9.2252	2.8750	0.2218	18.279045	2047.00
Polygon	41	25	25	269.9100	3793.7440	26.2985	7.9879	8.9983	2.3406	0.1734	18.288817	1979.00
Polygon	29	26	26	2.8500	548.3876	16.7764	10.9441	13.0670	0.1481	0.0304	18.281586	1915.00
Polygon	42	27	27	140.6200	2162.4897	44.4244	11.2950	15.9212	1.9600	0.1468	18.285087	1862.00
Polygon	49	28	28	376.5700	4648.2832	26.7537	6.2720	18.4600	2.8562	0.2239	18.274280	1925.00
Polygon	39	29	29	45.8500	3943.3746	26.8117	6.6326	12.7926	1.9040	0.1108	18.267478	1987.00
Polygon	44	30	30	52.3000	1946.2676	26.4080	6.0308	18.7361	0.8744	0.1803	18.267641	1792.00
Polygon	47	31	31	190.4300	2812.7309	25.8083	6.0168	18.7832	1.6481	0.1537	18.270204	1707.00
Polygon	53	32	32	443.6900	2619.6894	41.4381	5.7789	15.2493	3.7582	0.2759	18.269264	1739.00
Polygon	51	33	33	714.2500	7038.2327	23.5385	6.6704	18.5794	4.1584	0.2954	18.274674	2012.00
Polygon	50	34	34	244.3000	4577.0363	22.8080	9.2975	8.6824	2.7091	0.2132	18.274986	1739.00
Polygon	52	35	35	273.8900	4379.5209	26.8174	6.2894	12.8796	2.3501	0.1962	18.266572	1894.00

Figura 4.18. Tabla de atributos del archivo subbasins.shp

4.3.9. Análisis estadístico

Se realizó una la prueba estadística de comparación de medias de dos poblaciones, para comparar los valores del factor topográfico *LS*, estimados mediante la técnica del álgebra de mapas y los del modelo SWAT; antes y después de la corrección de la longitud de la pendiente en SWAT.

Antes de aplicar la prueba estadística y partiendo del supuesto de normalidad de los datos y de homogeneidad de varianzas, fue necesario realizar la comparación de las varianzas de dos poblaciones, en este caso los *LS* del álgebra de mapas y los del SWAT.

Las fórmulas empleadas y el procedimiento corresponden al descrito por Montgomery y Runger (2007).

La distribución de F nos permite probar hipótesis sobre los tamaños relativos de las dos varianzas. Estableciendo el siguiente juego de hipótesis, tenemos:

$$H_0: \frac{\sigma^2 X}{\sigma^2 Y} = 1 \text{ en oposición a } H_a: \frac{\sigma^2 X}{\sigma^2 Y} \neq 1 \quad (4.2)$$

Como se parte del supuesto de que $\sigma^2 X = \sigma^2 Y$, entonces la estadística de prueba es:

$$F_0 = \frac{S^2 X}{S^2 Y} \quad (4.3)$$

La distribución de F con $n-1$ y $m-1$ grados de libertad, en el numerador y denominador respectivamente.

Para probar nuestras hipótesis la regla de decisión es:

$$\text{Rechazar } H_0 \text{ si } F_0 \geq F_{m-1}^{n-1}(\alpha/2) \text{ o si } F_0 \leq \frac{1}{F_{n-1}^{m-1}(\alpha/2)} \quad (4.4)$$

Una vez demostrado que las varianzas de las dos muestras fueron iguales, se procedió a realizar una prueba estadística para la comparación de las medias de dos poblaciones. La estadística que se utilizó es la prueba de t de *student*, para varianzas iguales (formula 4.5) con el procedimiento descrito por Montgomery y Runger (2007).

$$t_0 = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta_0}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n} + \frac{S_p^2}{m}}} \quad (4.5)$$

Para que un estimador de σ^2 que utilice toda la información disponible debe tener en cuenta a las dos muestras, por lo que se usó el siguiente estimador ponderado:

$$S_p^2 = \frac{(n-1)S^2X + (m-1)S^2Y}{n+m-2} \quad (4.6)$$

Se planteó el siguiente juego de hipótesis: $H_0: \mu X = \mu Y$ en oposición a $H_a: \mu X \neq \mu Y$

Aplicando el siguiente criterio: rechazo H_0 si $|t_0| \geq t_{\alpha/2}(n+m-2)$

Como la hipótesis que se quiere probar es simplemente que las medias de los tratamientos son iguales, contra la alternativa de que son diferentes, por lo que en este caso $\delta_0 = 0$.

En la comparación estadística de los LS con valores de L_h corregidos, la comparación de varianzas resultaron diferentes; por lo que, en la prueba de t de *student* que se planteó fue para varianzas diferentes; la cual establece el siguiente juego de hipótesis: $H_0: \mu X = \mu Y$ en oposición a $H_a: \mu X \neq \mu Y$

Aplicando el siguiente criterio: rechazo H_0 si $|t_0| \geq t_{\alpha/2}(\nu)$, donde ν son los grados de libertad y se obtiene con la expresión (4.7).

$$\nu = \frac{\left(\frac{S^2X}{n} + \frac{S^2Y}{m} \right)^2}{\frac{\left(S^2X/n \right)^2}{n+1} + \frac{\left(S^2Y/m \right)^2}{m+1}} - 2 \quad (4.7)$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Producto de la delimitación de la cuenca en el modelo SWAT, se obtuvo un área de cuenca de 148.064 km² y un total de 35 subcuencas, para las cuales en el Cuadro 5.1 se reportan su superficie, pendiente media, elevación media y la longitud de la pendiente; en el dicho cuadro se puede observar que la subcuenca con mayor pendiente es la número 2 con 49.8% y la de menor pendiente es la número 14 con 6.6%. Con respecto a la superficie, la subcuenca 11 es la que posee mayor extensión de la cuenca ocupando el 9.8%, seguida de las subcuencas 5 y 6 con el 9.1%; en contra parte la subcuenca 26 sólo abarca el 0.02% del área total de la cuenca, siendo la más pequeña.

Las corrientes principales que se definieron por el modelo SWAT se reportan el Cuadro 5.2, en el que se muestran la longitud, la pendiente media del cauce y la elevación mínima y máxima que SWAT definió para cada corriente, siendo la subcuenca 5 la que presenta una longitud de cauce mayor con 6,959.9 m; y la subcuenca con mayor pendiente media del cauce resultó ser la 1 con 16%. En el Anexo 1, plano 1 de 11 “Delimitación de la cuencas y subcuencas”, se presenta la delimitación de la cuenca y sus subcuencas y en el plano 2 de 11 “Corrientes definidas en SWAT” se ilustran las corrientes principales definidas por el modelo.

Cuadro 5.1. Principales parámetros de las subcuencas

SUBCUENCA	ÁREA	PENDIENTE	ELEVACIÓN	LONGITUD DE LA PENDIENTE
	<i>Ac</i>	<i>Slo1</i>	<i>Elev</i>	<i>L_h</i>
	(ha)	(%)	(m.s.n.m.)	(m)
1	506.0	44.4	2,901.00	0.05
2	342.6	49.8	2,903.00	0.05
3	708.7	42.6	2,686.00	0.05
4	389.3	48.0	2,704.00	0.05
5	1,349.5	39.7	2,746.00	0.05
6	1,346.0	27.4	2,583.00	0.05
7	405.8	22.0	2,253.00	15.24
8	394.2	29.2	2,488.00	0.05
9	660.2	32.8	2,357.00	0.05
10	287.0	18.7	2,238.00	18.29
11	1,453.5	27.1	2,324.00	0.05
12	465.7	36.6	2,298.00	0.05
13	347.8	7.3	2,219.00	60.98
14	408.8	6.6	2,181.00	60.98
15	167.0	24.1	2,107.00	15.24
16	516.1	37.5	2,204.00	0.05
17	152.0	14.9	2,045.00	24.39
18	88.2	12.1	2,041.00	24.39
19	533.8	22.1	2,119.00	15.24
20	538.8	21.4	2,017.00	15.24
21	57.1	23.2	1,946.00	15.24
22	42.0	23.7	1,928.00	15.24
23	427.0	34.6	2,075.00	0.05
24	380.3	34.3	2,047.00	0.05
25	269.4	28.3	1,979.00	0.05
26	2.6	19.7	1,915.00	18.29
27	140.0	44.4	1,862.00	0.05
28	376.6	36.8	1,925.00	0.05
29	65.9	36.1	1,887.00	0.05
30	52.3	38.6	1,793.00	0.05
31	150.4	33.7	1,707.00	0.05
32	443.7	41.4	1,739.00	0.05
33	714.3	33.6	2,013.00	0.05
34	344.1	23.1	1,739.00	15.24
35	279.9	36.1	1,694.00	0.05
TOTAL	14,806.4			

Cuadro 5.2. Cauces principales definidos en SWAT para las 35 subcuencas generadas

SUBCUENCA	LONGITUD DE CORRIENTE <i>Len2</i>	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE <i>Slo2</i>	ELEV. MÍN. DEL CAUCE	ELEV. MÁX. DEL CAUCE
	(m)	(%)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
1	1,140.1	16.0	2,498	2,678
2	525.9	11.9	2,498	2,560
3	3,164.5	8.4	2,260	2,525
4	734.0	5.2	2,260	2,298
5	6,959.9	9.2	2,197	2,837
6	5,567.9	6.9	2,198	2,581
7	3,022.2	5.3	2,099	2,260
8	2,240.6	9.0	2,098	2,299
9	6,146.7	7.5	2,038	2,498
10	2,465.1	6.5	2,038	2,198
11	5,447.3	4.8	2,097	2,356
12	921.8	7.0	2,097	2,161
13	860.7	7.1	2,018	2,079
14	1,563.2	4.3	2,017	2,084
15	2,337.0	3.6	2,017	2,100
16	1,404.7	5.8	2,019	2,100
17	2,943.9	5.9	1,926	2,100
18	1,204.9	7.8	1,926	2,020
19	2,526.0	4.7	1,918	2,037
20	1,399.0	5.8	1,920	2,001
21	987.2	5.1	1,877	1,927
22	854.3	5.0	1,877	1,920
23	3,681.2	4.8	1,863	2,038
24	908.0	8.8	1,860	1,940
25	3,303.0	5.1	1,861	2,029
26	365.3	4.9	1,859	1,877
27	1,672.3	7.3	1,744	1,866
28	1,295.4	8.8	1,746	1,860
29	1,191.5	12.3	1,718	1,864
30	558.6	5.6	1,718	1,749
31	1,817.6	2.3	1,677	1,718
32	865.0	2.4	1,677	1,698
33	2,836.3	6.8	1,646	1,838
34	1,876.4	1.7	1,646	1,677
35	389.6	1.5	1,640	1,646

5.2. PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA

Los principales parámetros que caracterizan a la cuenca Ixtapan del Oro, se muestran en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Parámetros físicos de la cuenca obtenidos en Idrisi

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Área de la cuenca	km ²	148.06
Perímetro del parteaguas	km	80.06
Elevación media de la cuenca	m.s.n.m.	2,339.65
Pendiente media de la cuenca	grados	16.74
Pendiente media de la cuenca	%	31.55
Coficiente de compacidad	Adimensional	1.85
Relación de circularidad	Adimensional	0.29
Relación hipsométrica	Adimensional	1.69
Longitud de la corriente	km	22.46
Longitud directa del cauce	km	15.97
Coficiente de sinuosidad	Adimensional	1.42
Elevación máxima del cauce	m.s.n.m.	3,144.00
Elevación mínima del cauce	m.s.n.m.	1,637.56
Pendiente media del cauce	%	6.70
Tiempo de concentración de Kirpich	h	2.05

De algunos de los parámetros que se presentan en el Cuadro 5.3, se interpretan como se menciona a continuación:

- Dado el valor de pendiente que se tiene en la cuenca y de acuerdo con Heras citado por Campos (1998), se trata de una cuenca fuertemente accidentada.

- Por el valor del coeficiente de compacidad de 1.85 se puede decir que la cuenca no tiene problemas de crecientes, ya que un valor cercano a 1 indica que la cuenca tiene una forma prácticamente circular, lo que se refleja problemas de crecientes.
- El coeficiente de sinuosidad nos indica que la trayectoria del cauce principal es recto, ya que valores cercanos a 1.25 indica una sinuosidad baja, por lo que el cauce de la cuenca Ixtapan del Oro se puede considerar como poco sinuoso.
- El tiempo de concentración indica el tiempo que tarda el escurrimiento de la tormenta en viajar desde el punto más alejado a la salida de la cuenca, por lo que el valor de 2.05 h indica que se trata de una cuenca bien drenada y con una respuesta rápida al desalojo de agua.
- También se obtuvo el perfil del cauce principal y la curva hipsométrica de la cuenca, mismos que se muestran en las Figuras 5.1 y 5.2. Dada la forma de la curva hipsométrica se deduce que se trata de una cuenca geológicamente madura y en etapa de equilibrio.

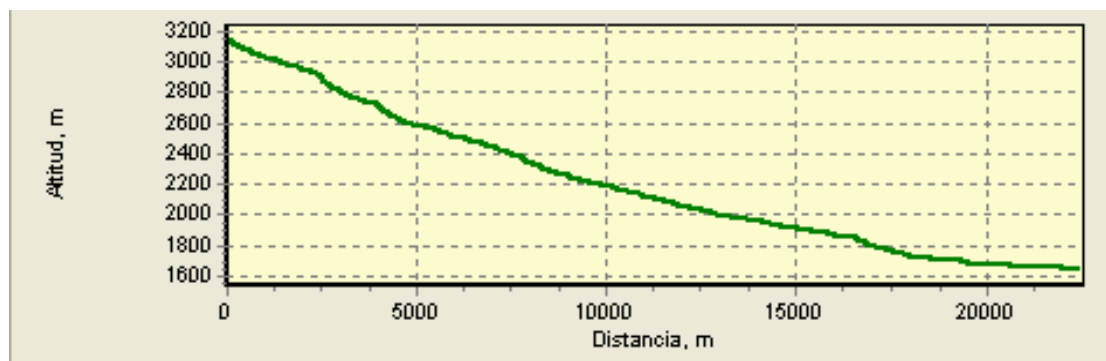


Figura 5.1. Perfil del cauce principal

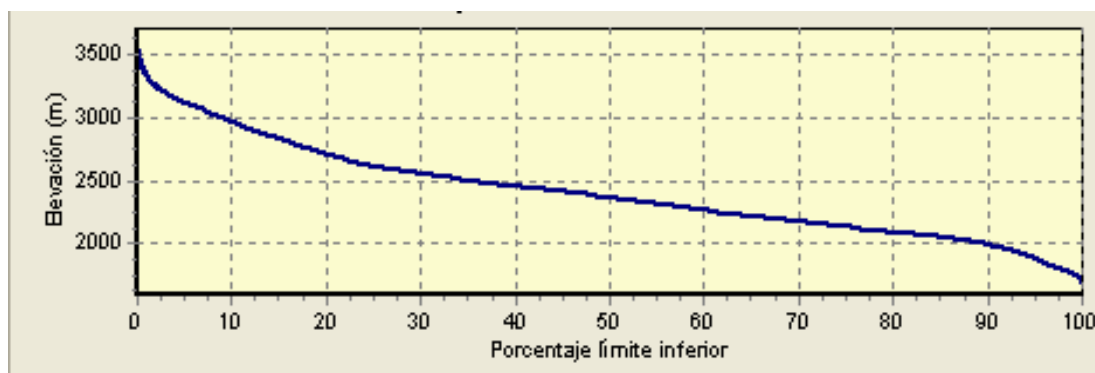


Figura 5.2. Curva hipsométrica de la cuenca

5.3. EROSIÓN CON ÁLGEBRA DE MAPAS

En el proceso de la estimación de la erosión hídrica mediante el álgebra de mapas se generaron planos de los factores de EUPS, los cuales se presentan en el Anexo 1, representando a los factores en el siguiente orden:

- Plano 3 de 11: Factor de erosividad de la lluvia R
- Plano 4 de 11: Factor de erosionabilidad del suelo K
- Plano 5 de 11: Factor topográfico LS
- Plano 6 de 11: Cobertura vegetal
- Plano 7 de 11: Factor de cobertura vegetal C
- Plano 8 de 11: Erosión hídrica actual, enero de 2004
- Plano 9 de 11: Erosión hídrica potencial anual

En el Cuadro 5.4, se presentan las clases de erosión de acuerdo a la clasificación de la FAO, y su respectiva área de afectación en la cuenca, del que se puede observar que el

84.3% de la cuenca no tiene problemas de erosión ya que se encuentra cubierta con alguna especie forestal; por el contrario 511.2 ha se encuentran con erosión severa y muy severa; la mayor parte de esta superficie se localiza en las subcuencas 15 y 33 y que pertenecen al municipio de Ixtapan del Oro.

En el Cuadro 5.5, se reportan las superficies por clases de erosión afectadas en los municipios que abarca la cuenca y, en el que se puede apreciar que de los cuatro municipios, es Ixtapan del Oro el que presentó mayor superficie (55.2 ha) con problemas de erosión muy severa; por el contrario, fue Donato Guerra en que tuvo mayor superficie (7,452.3 ha) con erosión incipiente; su apreciación gráfica se detalla en Figura 5.3.

Cuadro 5.4. Erosión hídrica en la cuenca de acuerdo a la clasificación FAO y superficies afectadas

RANGO DE EROSIÓN (t/ ha año)	CLASE DE EROSIÓN	SUPERFICIE	
		ha	%
00 - 005	Incipiente	12,487.6	84.3
05 - 010	Ligera	651.2	4.4
10 - 050	Moderada	1,156.4	7.8
50 - 200	Severa	435.1	2.9
> 200	Muy Severa	76.1	0.5
TOTAL		14,806.4	100.0

Cuadro 5.5. Erosión hídrica actual distribuida en los cuatro principales municipios de la cuenca

RANGO DE EROSIÓN (t/ ha año)	CLASE DE EROSIÓN	DONATO GUERRA		IXTAPAN DEL ORO		VILLA DE ALLENDE		ZITÁCUARO	
		SUPERFICIE POR MUNICIPIO							
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
00 - 005	Incipiente	7,452.3	88.4	2,848.2	82.2	1,858.1	72.7	317.4	92.3
05 - 010	Ligera	320.8	3.8	142.5	4.1	161.8	6.3	25.9	7.5
10 - 050	Moderada	539.8	6.4	186.3	5.4	432.3	16.9	0.4	0.1
50 - 200	Severa	104.2	1.2	233.0	6.7	97.6	3.8	0.0	0.0
> 200	Muy Severa	11.6	0.1	55.2	1.6	6.3	0.2	0.0	0.0
TOTAL		8,428.8	100.0	3,465.2	100.0	2,556.0	100.0	343.7	100.0

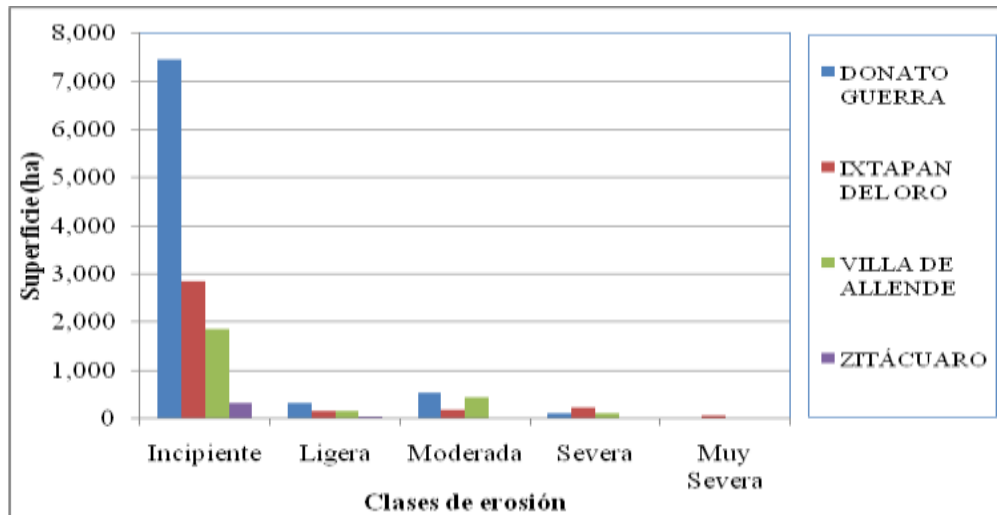


Figura 5.3. Erosión hídrica en los municipios de la cuenca

5.4. EROSIÓN CON SWAT

Producto de la corrida del modelo SWAT y del álgebra de mapas se generó el Cuadro 5.6 que resume los datos obtenidos de erosión; en él se nota que los valores de erosión en las subcuencas con pendiente mayor del 25% resultan muy diferentes con SWAT y álgebra de mapas; y cuando la pendiente es menor del 25% los valores de erosión pueden ser similares. En la Figura 5.4 se puede apreciar cuales son las subcuencas que presentan mayor diferencia en los valores de erosión con SWAT y álgebra de mapas; en el mismo cuadro, también se presentan los valores de los sedimentos de la EUPSM estimada con SWAT.

Dado que los valores de erosión del álgebra de mapas y del SWAT resultaron muy diferentes, y como los valores de erodabilidad y cobertura vegetal, fueron los mismo, sólo quedo por indagar en el factor topográfico y la erosividad de la lluvia

Cuadro 5.6. Erosión con SWAT por subcuencas

SUBCUENCA	ÁREA (ha)	PENDIENTE (%)	EUPS CON SWAT (t/ha año)	EUPS CON ÁLGEBRA DE MAPAS (t/ha año)	EUPSM DEL SWAT (t/ha año)
1	506.0	44.4	0.008	0.650	0.001
2	342.6	49.8	0.010	1.153	0.001
3	708.7	42.6	0.012	0.970	0.002
4	389.3	48.0	0.024	0.861	0.003
5	1,349.5	39.7	0.000	0.642	0.000
6	1,346.0	27.4	1.946	12.016	1.223
7	405.8	22.0	0.220	0.438	0.111
8	394.2	29.2	0.006	1.200	0.001
9	660.2	32.8	0.008	2.188	0.001
10	287.0	18.7	0.532	4.582	0.101
11	1,453.5	27.1	0.077	2.044	0.028
12	465.7	36.6	0.062	1.769	0.017
13	347.8	7.3	29.878	6.206	34.900
14	408.8	6.6	41.144	11.737	52.687
15	167.0	24.1	103.601	35.821	139.213
16	516.1	37.5	0.002	12.869	0.009
17	152.0	14.9	14.450	6.271	10.996
18	88.2	12.1	21.260	6.910	16.147
19	533.8	22.1	0.122	3.720	0.038
20	538.8	21.4	0.123	2.791	0.037
21	57.1	23.2	0.018	6.537	0.044
22	42.0	23.7	25.276	22.251	17.091
23	427.0	34.6	0.161	9.428	0.025
24	380.3	34.3	0.001	3.003	0.003
25	269.4	28.3	2.537	26.182	1.873
26	2.6	19.7	0.462	15.738	0.191
27	140.0	44.4	0.011	11.918	0.002
28	376.6	36.8	0.011	0.751	0.003
29	65.9	36.1	0.001	8.967	0.001
30	52.3	38.6	0.008	1.004	0.001
31	150.4	33.7	1.240	16.856	0.665
32	443.7	41.4	0.043	5.320	0.007
33	714.3	33.6	3.426	29.714	3.487
34	344.1	23.1	40.387	19.217	44.328
35	279.9	36.1	0.026	5.116	0.004
	14,806.4				

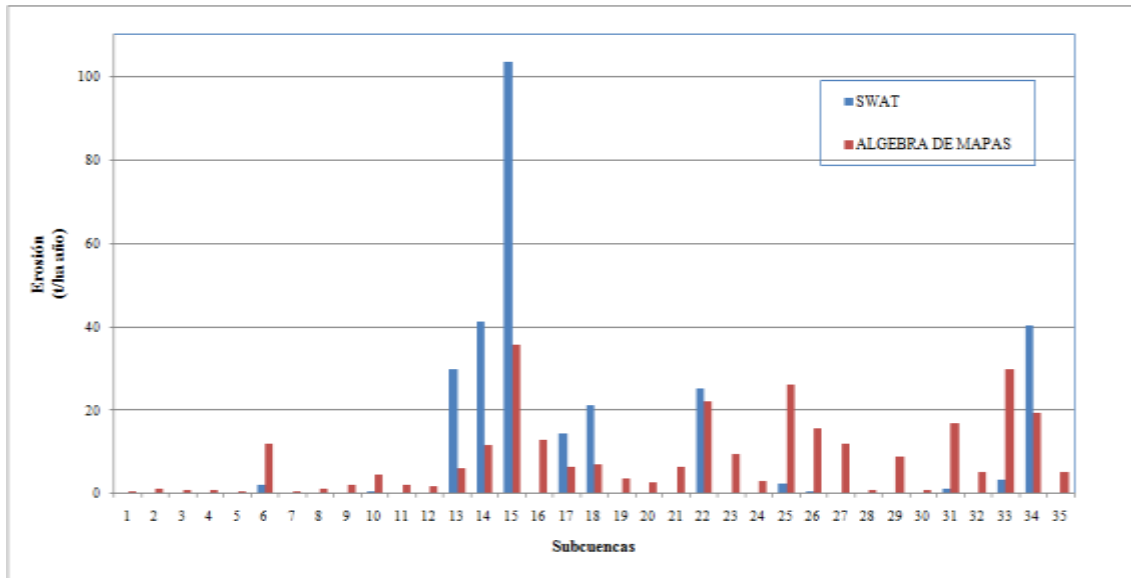


Figura 5.4. Comparación de la erosión por subcuenca

5.5. COMPARACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO

Para la comparación de los valores de LS se aplicó una prueba estadística de comparación de medias de dos poblaciones descrita en el apartado 4.3.9.

Los LS estimados con álgebra de mapas se denotaron como la población X con n repeticiones, y para LS del SWAT como la población Y con m repeticiones, y se obtuvieron las medias y varianzas que se muestran en el Cuadro 5.7.

Realizando los cálculos de la estadística de prueba, resulto:

$$F_0 = \frac{S^2 X}{S^2 Y} = \frac{2.10}{1.85} = 1.1303$$

Cuadro 5.7. Valores de *LS* del álgebra de mapas y del SWAT

SUBCUENCA	PENDIENTE (%)	LS DEL ÁLGEBRA DE MAPAS X	LS DE SWAT Y
1	44.4	5.465	0.33
2	49.8	6.201	0.39
3	42.6	5.278	0.31
4	48.0	5.969	0.37
5	39.7	4.808	0.28
6	27.4	3.164	0.15
7	22.0	2.503	3.25
8	29.2	3.401	0.17
9	32.8	3.882	0.20
10	18.7	2.036	2.78
11	27.1	3.156	0.15
12	36.6	4.381	0.24
13	7.3	0.576	1.31
14	6.6	0.519	1.13
15	24.1	2.748	3.78
16	37.5	4.548	0.25
17	14.9	1.558	2.29
18	12.1	1.159	1.65
19	22.1	2.514	3.27
20	21.4	2.451	3.11
21	23.2	2.618	3.55
22	23.7	2.731	3.67
23	34.6	4.107	0.22
24	34.3	4.055	0.22
25	28.3	3.346	0.16
26	19.7	2.226	3.02
27	44.4	5.387	0.33
28	36.8	4.408	0.24
29	36.1	4.191	0.24
30	38.6	4.667	0.26
31	33.7	4.043	0.21
32	41.4	5.094	0.29
33	33.6	4.047	0.21
34	23.1	2.617	3.52
35	36.1	4.302	0.24
Media	X y Y	3.55	1.19
Desviación Estándar	Sx y Sy	1.45	1.36
Varianzas	S²X y S²Y	2.10	1.85
Número de repeticiones	n y m	35	35

Consultando la tabla de F se encontró que para $F_{35-1}^{35-1}(0.1/2) = 0.5643$ y $F_{35-1}^{35-1}(1-0.1/2) = 1.7720$; y como $0.5643 < 1.1303 < 1.7720$, no se rechaza la hipótesis H_0 , por lo que se concluye que las varianzas de los valores de LS del álgebra de mapas y SWAT son iguales a un nivel de significancia de 0.1.

Una vez demostrado la igualdad de varianzas se aplicó la prueba t de *student* descrita en el apartado 4.3.9., obteniendo los siguientes valores de la prueba:

$$S_p^2 = 1.9749$$

$$t_0 = \frac{(3.55 - 1.19) - 0}{\sqrt{\frac{1.97}{35} + \frac{1.97}{35}}} = 7.0053$$

Bajo un nivel de significancia de 0.1 y consultado en la tabla de t se tiene $t_{0.1/2}(35 + 35 - 2) = 1.6675$.

Como $|t_0| = 7.0053 > t_{\text{tablas}} = 1.6675$, se rechaza la hipótesis H_0 , con lo cual se puede concluir que existe diferencia significativa entre los valores medios de LS del álgebra de mapas y los del SWAT, a un nivel de significancia de 0.1

Por otro lado, en el Cuadro 5.7, se observa que los valores de LS de las subcuencas con pendiente mayor al 25%, resultaron poco comparables, debido a que son hasta en un 94% más grandes los valores del álgebra de mapas que los del SWAT. En la Figura 5.5 se pueden apreciar en una gráfica de barras los valores de LS .

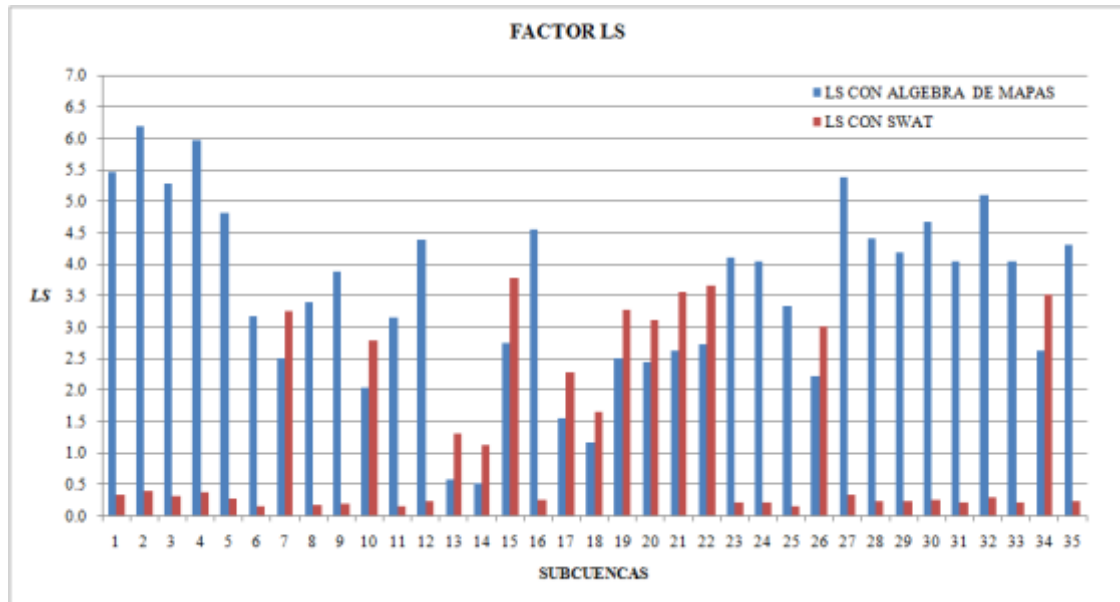


Figura 5.5. Valores del factor topográfico

5.6. CORRECCIÓN DE LA LONGITUD DE LA PENDIENTE

Debido a que se observó que SWAT presentó dificultades para estimar el factor topográfico, se exploró dentro de la ecuación que utiliza SWAT para calcular el LS , y se encontró que el problema se presenta cuando estima la longitud de la pendiente (L_h), sobre todo cuando la pendiente media de las subcuencas excede el 25%. En las subcuencas que presentaron pendiente mayor del 25%, SWAT asignó por defecto un L_h de 0.05 m, por lo que se encontró que en 22 subcuencas de las 35 se subestimó el factor topográfico. Tomando como base los valores de LS del álgebra de mapas, y retomando las pendientes calculadas por SWAT para cada subcuenca, se despejó L_h , llegando a la expresión (5.6), que resulta de un despeje de la (3.15) y en ella m se obtiene con la (3.16).

$$L_h = \left[\frac{LS}{65.41 \sin^2 \alpha_h + 4.56 \sin \alpha_h + 0.065} \right]^{1/m} \times 22.1$$

En el Cuadro 5.8 se incluyen los valores del ángulo de la pendiente α_h (en grados), los valores de LS de álgebra de mapas, el exponente m , y los L_h de SWAT de antes y los nuevos valores de que se introdujeron al SWAT para igualar el factor topográfico de SWAT con los del álgebra.

Con los valores corregidos del factor topográfico se hizo una según corrida del modelo y finalmente se obtuvieron nuevos valores de erosión, los cuales se compararon estadísticamente, aplicando el mismo procedimiento descrito en el apartado 4.3.9. que se usó para comparar los LS .

Los valores de erosión estimados con álgebra de mapas se consideraron como la población X con n repeticiones, y para la erosión con SWAT como la población Y con m repeticiones, y se obtuvieron las medias y varianzas que se muestran en el Cuadro 5.9, mismo que muestra los valores de erosión con el álgebra de mapas y los sedimentos en SWAT con la EUPSM.

Cuadro 5.8. Valores de la longitud de la pendiente corregidos y sus variables que lo definen

SUBCU- ENCA	PENDIENTE			m	LS DEL ÁLGEBRA DE MAPAS	L_h DE SWAT	L_h CORRE- GIDO
	(%)	α_h (°)	S_h (m/m)				
1	44.45	23.96	0.4445	0.600	5.465	0.05	5.415
2	49.79	26.47	0.4979	0.600	6.201	0.05	5.019
3	42.63	23.09	0.4263	0.600	5.278	0.05	5.691
4	48.04	25.66	0.4804	0.600	5.969	0.05	5.150
5	39.68	21.64	0.3968	0.600	4.808	0.05	5.877
6	27.35	15.30	0.2735	0.600	3.164	0.05	8.003
7	21.99	12.40	0.2199	0.600	2.503	15.24	9.852
8	29.21	16.28	0.2921	0.600	3.401	0.05	7.536
9	32.82	18.17	0.3282	0.600	3.882	0.05	6.841
10	18.71	10.60	0.1871	0.599	2.036	18.29	10.863
11	27.06	15.14	0.2706	0.600	3.156	0.05	8.204
12	36.63	20.12	0.3663	0.600	4.381	0.05	6.221
13	7.28	4.16	0.0728	0.556	0.576	60.98	14.048
14	6.62	3.79	0.0662	0.544	0.519	60.98	14.542
15	24.11	13.56	0.2411	0.600	2.748	15.24	8.946
16	37.52	20.57	0.3752	0.600	4.548	0.05	6.213
17	14.93	8.49	0.1493	0.597	1.558	24.39	12.735
18	12.13	6.91	0.1213	0.592	1.159	24.39	13.357
19	22.11	12.47	0.2211	0.600	2.514	15.24	9.787
20	21.39	12.07	0.2139	0.600	2.451	15.24	10.279
21	23.22	13.07	0.2322	0.600	2.618	15.24	9.145
22	23.67	13.31	0.2367	0.600	2.731	15.24	9.318
23	34.57	19.07	0.3457	0.600	4.107	0.05	6.526
24	34.27	18.92	0.3427	0.600	4.055	0.05	6.544
25	28.30	15.80	0.2830	0.600	3.346	0.05	7.997
26	19.73	11.16	0.1973	0.599	2.226	18.29	10.910
27	44.42	23.95	0.4442	0.600	5.387	0.05	5.295
28	36.79	20.20	0.3679	0.600	4.408	0.05	6.212
29	36.07	19.84	0.3607	0.600	4.191	0.05	6.022
30	38.61	21.11	0.3861	0.600	4.667	0.05	6.010
31	33.69	18.62	0.3369	0.600	4.043	0.05	6.816
32	41.43	22.50	0.4143	0.600	5.094	0.05	5.778
33	33.60	18.57	0.3360	0.600	4.047	0.05	6.878
34	23.08	13.00	0.2308	0.600	2.617	15.24	9.297
35	36.08	19.84	0.3608	0.600	4.302	0.05	6.289

Cuadro 5.9. Valores de erosión estimados mediante el SWAT, con valores corregidos de la longitud de pendiente

SUBCUENCA	EUPS ÁLGEBRA DE MAPAS (t/ha año)	EUPS SWAT Y L_h CORREGIDO (t/ha año)	EUPSM (t/ha año)
1	0.650	0.249	0.027
2	1.153	0.252	0.026
3	0.970	0.311	0.056
4	0.861	0.772	0.125
5	0.642	0.000	0.000
6	12.016	126.897	77.050
7	0.438	0.220	0.111
8	1.200	0.221	0.042
9	2.188	0.387	0.054
10	4.582	0.532	0.101
11	2.044	2.732	1.695
12	1.769	1.976	0.831
13	6.206	29.878	34.900
14	11.737	41.144	52.687
15	35.821	103.601	139.213
16	12.869	0.002	0.366
17	6.271	14.500	10.996
18	6.910	21.260	16.147
19	3.720	0.150	0.043
20	2.791	0.123	0.037
21	6.537	0.018	0.044
22	22.251	25.276	17.091
23	9.428	5.019	1.196
24	3.003	0.285	0.123
25	26.182	82.112	83.353
26	15.738	0.462	0.191
27	11.918	0.329	0.069
28	0.751	0.585	0.152
29	8.967	0.001	0.058
30	1.004	0.319	0.056
31	16.856	42.720	30.178
32	5.320	1.414	0.315
33	29.714	108.581	133.210
34	19.217	40.386	44.328
35	5.116	0.792	0.120
Media de X y Y	8.48	10.63	
Sx y Sy	9.05	19.45	
S²X y S²Y	81.85	378.26	
n y m	35	35	

Para la prueba de F en la comparación de las varianzas se obtuvo:

$$F_0 = \frac{S^2 X}{S^2 Y} = \frac{81.85}{378.26} = 0.2163$$

Consultando la tabla de F se encontró que para $F_{35-1}^{35-1}(0.1/2) = 0.5643$ y

$$F_{35-1}^{35-1}(1-0.1/2) = 1.7720$$

Como $0.2163 < 0.5643 < 1.7720$; se rechaza la hipótesis H_0 , ya que F_0 se localiza en la zona de rechazo, por lo que se concluye que las varianzas de los valores de la EUPS del álgebra de mapas y SWAT no son iguales a un nivel de significancia de 0.1.

Una vez demostrado que las varianzas de las dos muestras no son iguales, se procedió a realizar una prueba estadística para la comparación de las medias de dos poblaciones con varianzas diferentes obteniendo los siguientes valores:

$$t_0 = \frac{(8.48 - 10.63)}{\sqrt{\frac{81.85}{35} + \frac{378.26}{35}}} = -0.5929$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{81.85}{35} + \frac{378.26}{35}\right)^2}{\frac{\left(\frac{81.85}{35}\right)^2}{35+1} + \frac{\left(\frac{378.26}{35}\right)^2}{35+1}} - 2 = 48.8829$$

Bajo un nivel de significancia de 0.1 y consultado en la tabla de t se tiene

$$t_{0.1/2}(48.8829) = 1.6766.$$

Como $|t_0|=0.5929 < t_{\text{tablas}}=1.6766$, por lo tanto no se rechaza la hipótesis H_0 , con lo cual se puede concluir que no existe diferencia significativa entre los valores de la EUPS del álgebra de mapas y los del SWAT, a un nivel de significancia de 0.1

Del Cuadro 5.9 también se pudo notar que con la EUPS del SWAT existen 10 de las 35 subcuencas (3,878.04 ha) y que representan el 26.19%, se tienen problemas de erosión moderada y severa, en tanto que con el álgebra de mapas y asignando un valor promedio de erosión, se tiene 10 subcuencas abarcando 4,100.78 ha (27.70%) tiene problemas de erosión moderada y severa. En el plano 9 de 11 se presenta la erosión por subcuencas que se obtuvo del SWAT, siendo las subcuencas 6, 13, 14, 15, 18, 22, 25, 31, 33 y 34 las que presentan mayor erosión.

Los valores de erosión están reportados por subcuenca en los cuadros anteriores, son valores ponderados, ya que SWAT los genera por URH, los valores correspondientes por URH de erosión se reportan en el Anexo 2 Cuadro 9.1.

A simple vista, los valores de erosión del Cuadro 5.9, resultan diferentes con el álgebra de mapas y SWAT; sin embargo, se debe a que con álgebra de mapas se está tomando un valor promedio y dado que el cálculo se realizó por pixel, entonces existe mucha variación de valores de erosión y al sacar un promedio, se pierde precisión; además que, SWAT también asigna valores ponderados por URH; otra de las causas por las cuales los valores de erosión no son iguales, puede ser la diferencia de cálculo al momento de estimar la erosividad de la lluvia.

5.7. ESCURRIMIENTOS DE LA CUENCA

La estimación de los escurrimientos de la cuenca se obtuvo directamente del modelo SWAT, mismo que genera un balance hidrológico, determinando el agua disponible o que escurre en cada una de las URH; el balance se realizó anualmente, por lo que los valores que se reportan son el promedio del periodo de tiempo analizado. En el Cuadro 5.10, se reportan los valores del balance para cada una de las subcuencas; las variables que integran dicho cuadro son las siguientes: la precipitación (*PRECIP*), la evaporación potencial (*PET*), la evaporación actual (*ET*), contenido de agua en el suelo (*SW*), la percolación (*PERC*), el escurrimiento superficial (*SURQ*), el flujo base (*GW_Q*) y el agua producida (*WYLD*); la nomenclatura asignada a las variables corresponden a las reportadas por SWAT en sus tablas de salida.

En el Cuadro 9.1 del Anexo 2. se presentan las variables del balance pero con mejor detalle, ya que se reporta a nivel de URH. El caudal medio anual de agua que produce la cuenca de acuerdo al periodo de datos analizados, es de 1.875 m³/s, y un total de 117,600 t de sedimentos y en el Cuadro 5.11 se reportan los caudales y sedimentos para cada una de las subcuencas. Es preciso mencionar que los valores obtenidos son la primera aproximación a las variables medidas, ya que para tener una mejor precisión es necesario realizar la calibración del modelo, cosa que no fue posible realizar por falta de datos hidrométricos.

Cuadro 5.10. Resultados del balance hidrológico por subcuenca obtenido del SWAT

SUBCUENCA	<i>PRECIP</i> (mm)	<i>PET</i> (mm)	<i>ET</i> (mm)	<i>SW</i> (mm)	<i>PERC</i> (mm)	<i>SURQ</i> (mm)	<i>GW_Q</i> (mm)	<i>WYLD</i> (mm)
1	995.99	914.24	489.59	202.45	12.25	1.10	10.24	496.19
2	995.99	914.30	489.60	202.45	12.25	1.09	10.24	496.18
3	836.72	1,030.25	413.87	122.74	18.34	4.91	15.94	417.62
4	836.72	1,030.87	418.71	106.54	14.20	5.49	12.32	414.26
5	848.04	954.19	447.22	115.31	0.00	0.00	0.00	397.85
6	848.04	948.14	449.02	66.73	4.84	18.87	4.06	398.82
7	836.72	1,016.21	443.51	144.18	53.36	28.61	47.45	382.60
8	836.72	1,023.93	410.35	116.68	19.50	6.54	16.96	421.18
9	836.72	1,019.63	413.00	124.95	18.67	4.80	16.25	418.36
10	836.72	1,015.74	498.79	116.93	16.89	8.13	14.84	333.55
11	836.72	1,018.51	448.23	84.57	2.22	17.94	1.92	388.20
12	836.72	1,017.79	423.62	102.69	6.86	20.34	5.95	410.94
13	836.72	1,015.11	489.56	152.52	134.07	108.34	122.72	330.06
14	836.72	1,013.87	488.26	141.26	111.37	152.03	101.50	333.58
15	836.72	1,011.45	435.06	83.79	14.86	97.98	12.99	399.73
16	836.72	1,014.73	410.02	125.44	14.20	28.23	12.36	421.79
17	836.72	1,009.38	522.99	124.37	60.49	54.77	54.49	303.84
18	836.72	1,009.28	520.98	130.34	81.42	69.81	73.88	303.98
19	836.72	1,011.83	466.72	125.78	35.39	13.67	31.39	362.55
20	836.72	1,008.45	470.13	128.47	36.92	13.55	32.75	358.85
21	836.72	1,006.12	481.56	110.66	13.70	14.89	11.96	351.11
22	836.72	1,005.53	474.02	92.71	13.69	30.43	11.89	359.93
23	836.72	1,010.42	424.94	84.07	7.67	7.79	6.61	410.48
24	836.72	1,009.58	432.32	83.83	0.86	16.76	0.75	404.32
25	836.72	1,007.22	429.96	60.68	1.98	47.25	1.70	408.09
26	836.72	1,005.10	507.33	103.36	26.72	44.25	23.86	323.72
27	836.72	1,003.32	422.11	97.93	9.81	8.09	8.51	412.01
28	836.72	1,005.50	432.56	84.23	1.36	13.71	1.18	403.90
29	836.72	1,004.17	433.24	84.36	2.11	8.41	1.82	402.92
30	836.72	1,000.99	420.09	100.31	11.11	8.08	9.65	413.68
31	836.72	998.11	420.42	81.76	8.35	19.16	7.24	415.08
32	836.72	999.24	425.78	94.52	7.62	7.42	6.60	409.02
33	836.72	1,008.45	421.63	67.63	0.57	52.29	0.51	416.28
34	836.72	999.21	443.82	56.34	7.55	73.93	6.54	393.42
35	836.72	997.74	435.50	85.11	1.16	8.93	1.00	401.18

Cuadro 5.11. Caudales y sedimentos producidos en las subcuencas

SUBCUENCA	CAUDAL A LA SALIDA (m ³ /s)	SEDIMENTOS A LA SALIDA (t)	CONCENTRACIÓN DE LOS SEDIMENTOS (mg/L)
1	0.080	2.83	1.45
2	0.054	2.06	0.14
3	0.094	13.79	5.20
4	0.051	11.97	0.67
5	0.170	0.00	23.04
6	0.170	37,220.00	846.20
7	0.194	51.60	0.62
8	0.053	4.68	8.92
9	0.221	14.23	0.38
10	0.371	24,470.00	296.60
11	0.179	783.70	131.20
12	0.061	106.00	3.12
13	0.036	5,864.00	708.30
14	0.043	10,760.00	940.30
15	0.261	14,830.00	199.20
16	0.069	64.50	4.19
17	0.261	1,104.00	13.24
18	0.088	14,220.00	705.40
19	0.061	10.34	5.56
20	0.061	10.51	4.52
21	0.356	15,330.00	167.90
22	0.128	455.60	11.24
23	0.647	24,670.00	225.30
24	0.049	13.59	0.75
25	0.364	23,610.00	219.40
26	0.484	15,780.00	129.40
27	0.714	24,690.00	215.60
28	0.048	15.04	7.44
29	0.856	39,390.00	165.00
30	0.769	24,700.00	208.90
31	1.645	65,840.00	262.50
32	0.058	38.48	12.35
33	0.094	46,770.00	1,457.00
34	1.745	75,600.00	273.70
35	1.875	117,600.00	347.90

6. CONCLUSIONES

Se hizo una revisión sobre la aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT para el cálculo de la erosión de la cuencas, y se identificó su limitación respecto a la aplicación directa de la EUPS mediante la técnica del álgebra de mapas al estimar el factor topográfico (LS), y de éste en particular la longitud de la pendiente (L_h), llegando a las siguientes conclusiones:

1. Respecto al modelo:

- a) SWAT estima de forma errónea la longitud de la pendiente en las subcuencas, sobre todo cuando la pendiente es mayor del 25%, asignándole por defecto el valor de 0.05 m, lo que implica que subestima el factor topográfico.
- b) Es posible corregir los valores de longitud de pendiente mal estimados por SWAT, realizando su cálculo previamente, mediante otras herramientas computacionales o de forma manual e introduciéndoselos al SWAT. En todo caso y de acuerdo al trabajo realizado por Barrios (2000) puede ser más conveniente asignar un valor constante de longitud de pendiente igual a 100 para evitar subestimar el LS .

c) El modelo SWAT en las cuencas de México se ha aplicado en mayor medida para la realización de balances hidrológicos y no para la estimación de erosión o sedimentos, ya que tiene algunas limitantes como las que se encontraron en este trabajo.

d) La diferencias que siguen existiendo en los valores finales de erosión calculados por SWAT respecto a la técnica del álgebra de mapas, se pueden deber al método de estimación de la erosividad de la lluvia (R).

2. Respecto a la cuenca

a) La cuenca estudiada se encuentra en buen estado de conservación de sus suelos, ya que el 88.7% de su superficie se encuentra con grado de erosión incipiente y ligera, de acuerdo al cálculo de la erosión por el álgebra de mapas, considerando que este es más detallado, por arrojar valores por píxeles y no ponderados por subcuencas, como lo hace el modelo SWAT.

b) Se estimó que la cuenca Ixtapan del Oro aporta un caudal medio de $1.875 \text{ m}^3/\text{s}$ y que representa el 3% de toda el agua que se consume en el Distrito Federal y zona metropolitana, considerando que el sistema Cutzamala aporta el 25% ($15.6 \text{ m}^3/\text{s}$).

7. RECOMENDACIONES

7.1. SOBRE LA APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT

- Aplicar la técnica del álgebra de mapas para evaluar la EUPS, si sólo se desea estimar la pérdida de suelo anual.
- Utilizar el modelo SWAT únicamente para la realización de balances hidrológicos, y siempre que se tenga información disponible de hidrometría, realizar su calibración para una mejor estimación de las variables.
- Proponer al Agricultural Research Service (ARS) de los Estados Unidos (Dr. Jeff Arnold, creador de SWAT) revisar su algoritmo para el cálculo de las longitudes de pendiente, de modo que su aplicabilidad se amplíe a valores mayores de pendiente en las cuencas muy accidentadas.
- Proponer al ARS de los E.U. dar opciones para introducir la *R*, libremente.

7.2. SOBRE LA CUENCA ESTUDIADA

- Realizar prácticas de conservación de suelos, agua y bosque en las subcuencas 6, 13, 14, 15, 25, 31, 33, 34, ya que son las que presentaron valores de erosión relativamente más altos.
- Instrumentar la cuenca para la medición de parámetros hidrológicos y meteorológicos, para tener datos confiables con los cuales se pueda realizar la calibración de modelos en futuros estudios.

8. LITERATURA CITADA

Aparicio M., F.J. 2001. Fundamentos hidrológicos de superficie. Ed. Limusa. México D.F. 303 p.

Arellano M., J. L. 1994. La degradación de suelo por erosión hídrica en Chiapas: evaluación y principios tecnológicos para su control. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Barrios R., A. G. 2000. Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con Idrisi aplicación en una microcuenca Andina. Revista Forestal Venezolana 44 (1): 57-64

Campos A., D. F., 1998. Procesos del ciclo hidrológico, Tercera reimpresión. Universidad de San Luís Potosí, Facultad de Ingeniería. San Luís Potosí, S.L.P., México

CONAGUA. 2006. Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento en las cuencas de los ríos huixtla, huehuetán y coatán, del estado de Chiapas. 1ra. Edición. Universidad Autónoma Chapingo para la Comisión nacional de Agua, Chapingo, México

Cook H., L. 1936. The nature and controlling variables of de water erosion process. Soil Sc. So. Am. Proc

Cortés T., H. G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Centro de Edafología Montecillos, México

De la Fraga L., G. 2001. Curso de procesamiento digital de imágenes. <http://delta.cs.cinvestav.mx/~fraga/Cursos/PDI/cap1.pdf>

Derspsch, R. 2004. Entender el proceso de la erosión y de la infiltración del agua en el suelo. No-till on the Plains Inc. <http://www.rolf-derpsch.com/erosion-es.html>

Di Luzio M., Srinivason, R. Arnold, J. G., Neitsch, S.L. 2002. Soil and Water Assessment Tool; User's Guide; version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service. 808 East Blackland Road. Temple, Texas; 76502 and Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station. 720 East Blackland Road. Temple, Texas; 76502. United States American

Figuerola S., B., Amante O. A., Cortes T. H., Pimentel L. J., Osuna C. E., Rodríguez O. J., Morales F. F., 1991, Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados

Franco P., R. 2008. Concepción e implementación de un modulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca, México. 169 p.

García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 4ª. Edición. México D.F. 217 p.

Gaspari F., J., Delgado, M. I., Denegri, G. A. 2008. Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. Terra Latinoamericana 27: 43-51

Gómez J., I., Romero, C. R., Beneitez, L. J. M. 2007. Consideración de la dinámica espacio-temporal para la definición de actuaciones defensivas contra la erosión. GeoFocus: 7 1-22

González G., R., 2003. Automatización del sistema de evaluación y diagnóstico ecológico para el ordenamiento del territorio (SEDEOT). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Chapingo, México. 89 p.

González M., R., Volke, H. V., González, R. J. 2007. Efecto de la erosión del suelo sobre el rendimiento de maíz de temporal. Terra Latinoamericana 25: 399-408

Guzmán E., Bonini T., Matamoros D. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica caso de estudio: Cuenca del río Chaguana. Revista Tecnológica 17 (1): 152-161.

Hudson, N. 1982. Conservación del suelo. Ed. Reverte S.A. Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas-México-Río de Janeiro. 335 p.

INEGI. 1994a. Carta topográfica, E14A36 Villa de Allende, escala 1:50,000. Aguascalientes. Aguascalientes, México

INEGI. 1994b. Ortofotos E14A36a, E14A36b, E14A36d y E14A36e. Aguascalientes. Aguascalientes, México

INEGI. 1994c. Carta edafológica, E14A36 Villa de Allende, escala 1:50,000. Aguascalientes. Aguascalientes, México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1999. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, (BANDAS). Jiutepec, Mor. México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2006. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III). Jiutepec, Mor. México

Laruse, M., Oropeza, M. J. L., Norton, D., Turrent, F. A., Martinez, M. M., Pedraza, O. J. A., Nicolas N. F. 2004. Application of the wepp model to hillside lands In the Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 38: 155-163

Mancilla V., O. R., Oropeza, M. J. L., Martínez, M. M., Ríos, B. D., Guevara, G. R. D. 2009. Evaluación de Terrazas de Banco para plantaciones forestales comerciales. XV Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, A.C. Puerto Vallarta, Jalisco, México

Martínez M., M. 2008. Curso de Manejo Integral de Cuencas. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos

Martínez M., M. R., López, M. R., Hernández F. E. 2001. Relación sedimentos-erosión en la cuenca alta del Papaloapan. XI Congreso Nacional de Irrigación, ANEI, A.C. Guanajuato, Guanajuato, México

McCuen R., H. 2005. Hydrologic analysis and design. Third Edition. Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland. Pearson Prentice-Hall

Montgomery D., C., Runger, G. 2007. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. "2da. ed. Limusa Wiley. México D.F. 948 p.

Neitsch S., L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. y Williams, J. R. 2002a. Soil and Water Assessment Tools; Theoretical Documentation; version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center of Texas Agricultural Experiment Station. Texas, USA.

Neitsch S., L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. y Williams, J. R. 2002b. Soil and Water Assessment Tools; User's Manual; version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center of Texas Agricultural Experiment Station. Texas, USA.

Oñate F., V., y Aguilar, N. G. 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en cuenca alta del río Catamayo. Tercer congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográfica. Arequipa, Perú

Oropeza M., J. 2006. Curso de conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación

Pando M., M., Gutiérrez, G. M., Maldonado, H. A., Palacio P. J. L., Estrada, C. E. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geografía, núm. 51. Pp. 23-36

Rienzi E., A., Maggi, A. E., Navone, S. M., Movia, C. P. 1999. Factores que regulan la erosión hídrica en la cuenca del Río Santa María, provincia de Catamarca, Argentina. *Terra*: 17 (1)

Rivera R., P., Medina, M. R., Medina, S. M. 2009. Determinación de parámetros hidrológicos en el sistema suelo-bosque-agua en laderas y microcuencas. XV Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, A.C. Puerto Vallarta, Jalisco, México

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

Rodríguez F., M., Florentino, A., Gallardo, J., De Antonio, G. R. 2004. Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajuz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical* 54 (4): 391-409

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2005. Actualización del programa de ordenamiento ecológico de la región mariposa monarca. Elaborado por la Unidad Académica Morelia del Instituto de Geografía de la UNAM para la SEMARNAT. Morelia, Michoacán

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2008. Base de datos climática (CLICOM)

Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical* 54 (3): 275-291

Torres B., E., Mejía, S. E., Cortés, B. J., Palacios, V. E., Exebio, G. A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río la Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39: 481-490

Torres B., E., Oropeza, M. J. L., Fernández R. D. S. 2000. Aplicación del modelo SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación, ANEI, A.C. Chihuahua, Chihuahua, México

Uribe G., S., Nicolás F. N., Turrent, F. A. 2002. Pérdida de suelo y nutrientes en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168

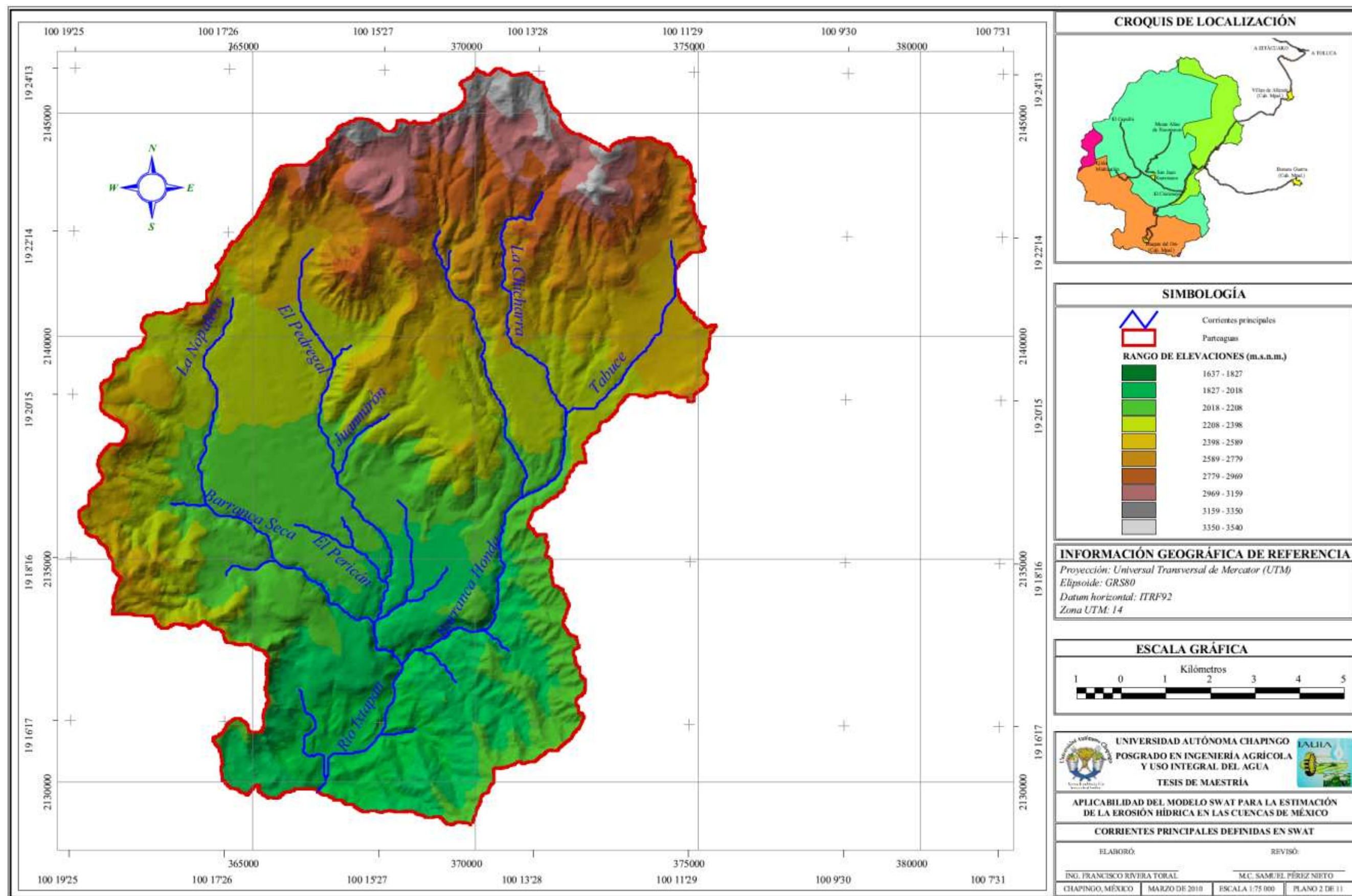
Vergara S., M. A., Etchevers B. J. D. 2006. Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 40: 557-567

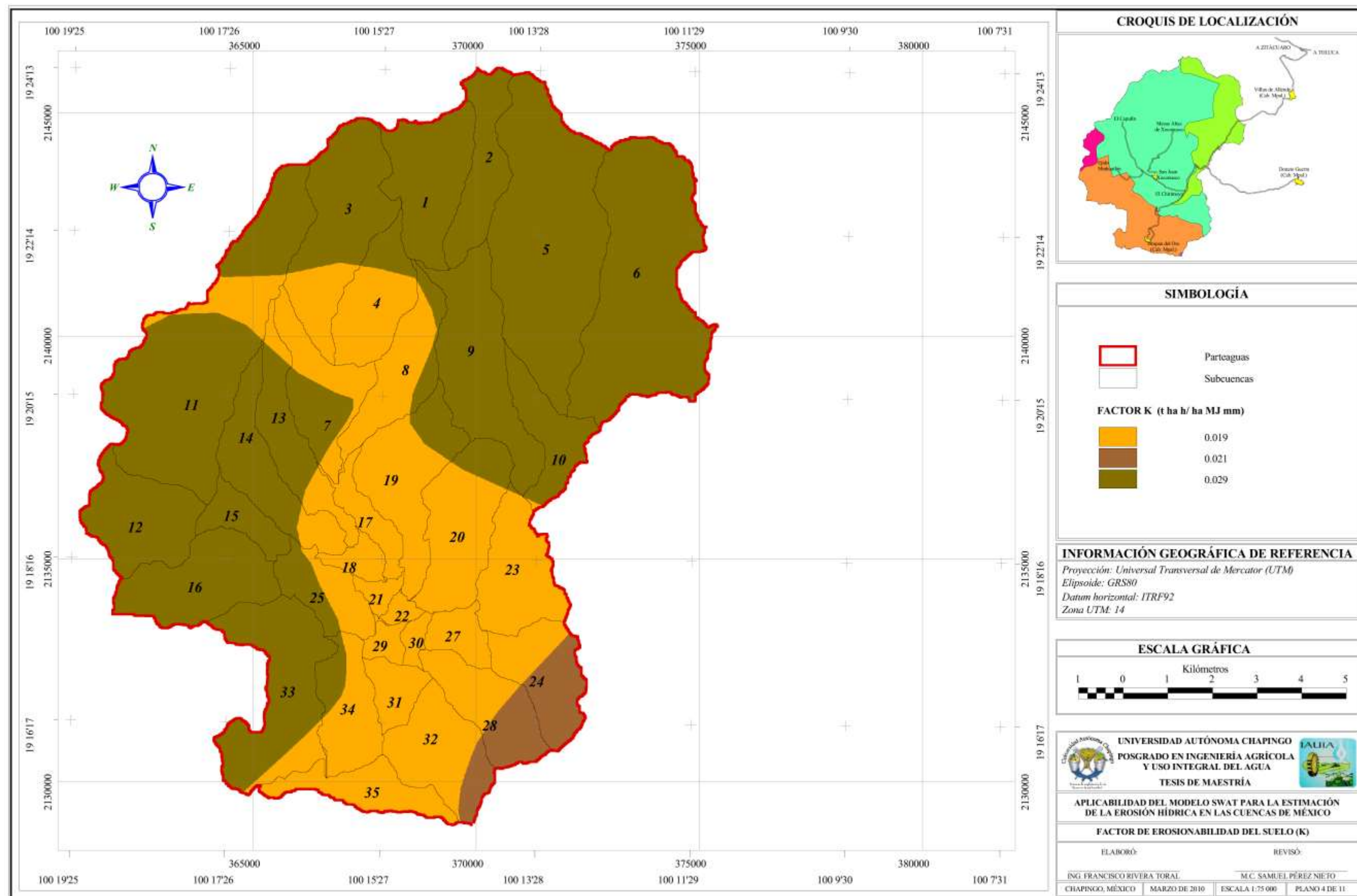
Wischmeier W., H., y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agr. Handbook* 537. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C.

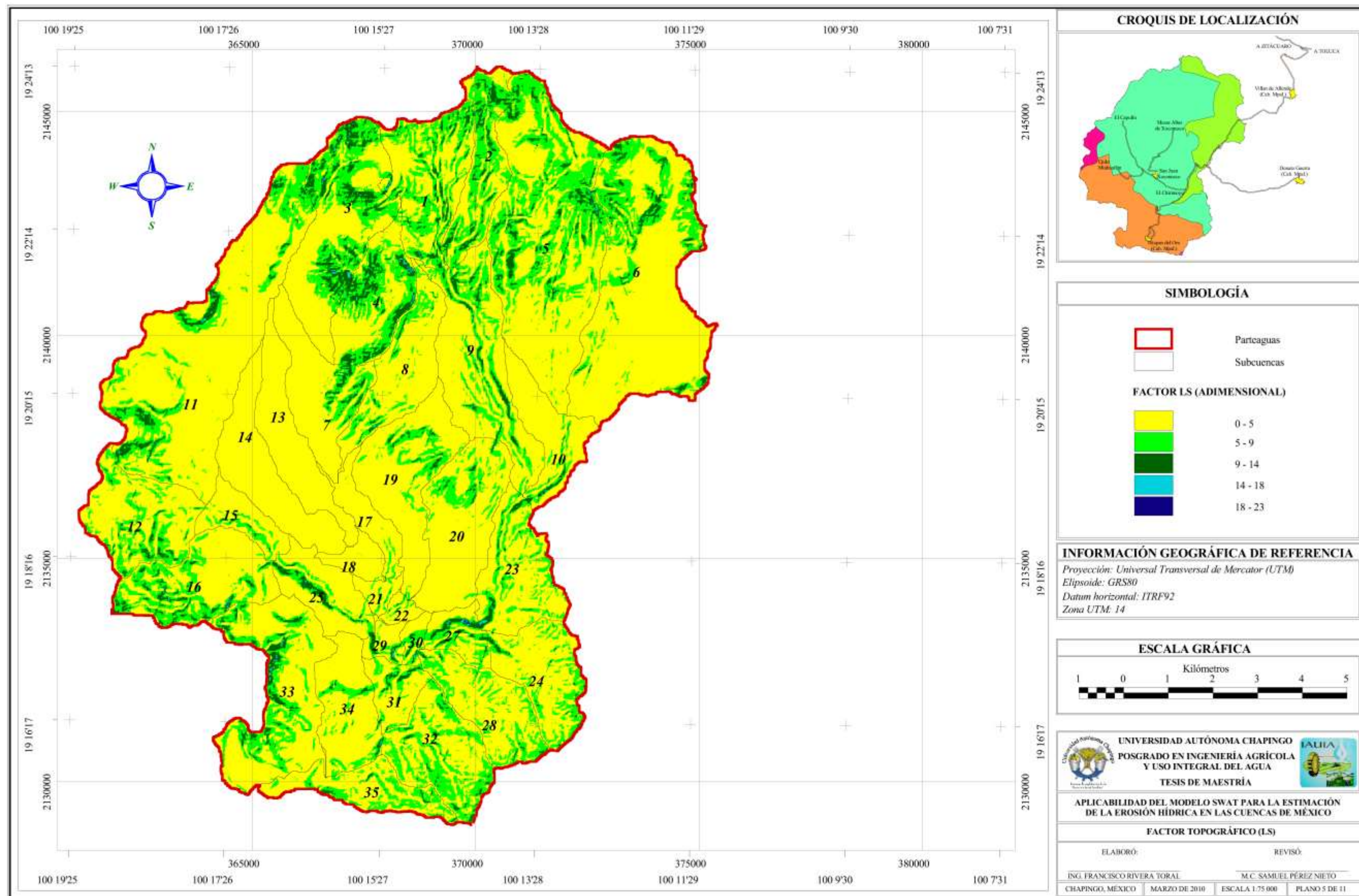
9. ANEXOS

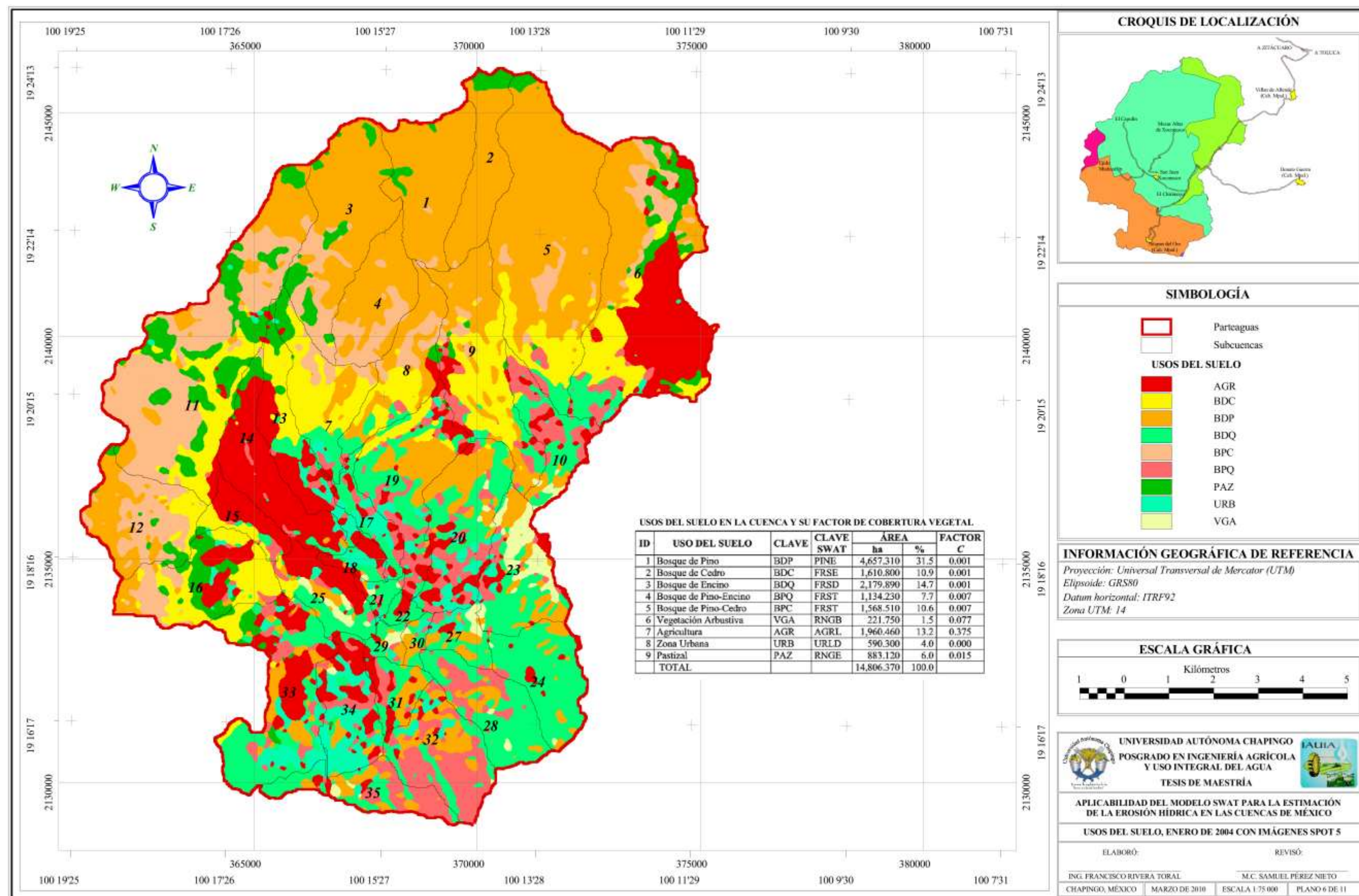
Los anexos se dividen en 1, 2. En el Anexo 1 se presentan los planos de la delimitación de la cuenca y cada uno de los factores de la EUPS, los usos del suelo, así como los planos de erosión y escurrimiento producto de la modelación en SWAT. El Anexo 2 contiene los principales datos numéricos de la modelación en SWAT por URH.

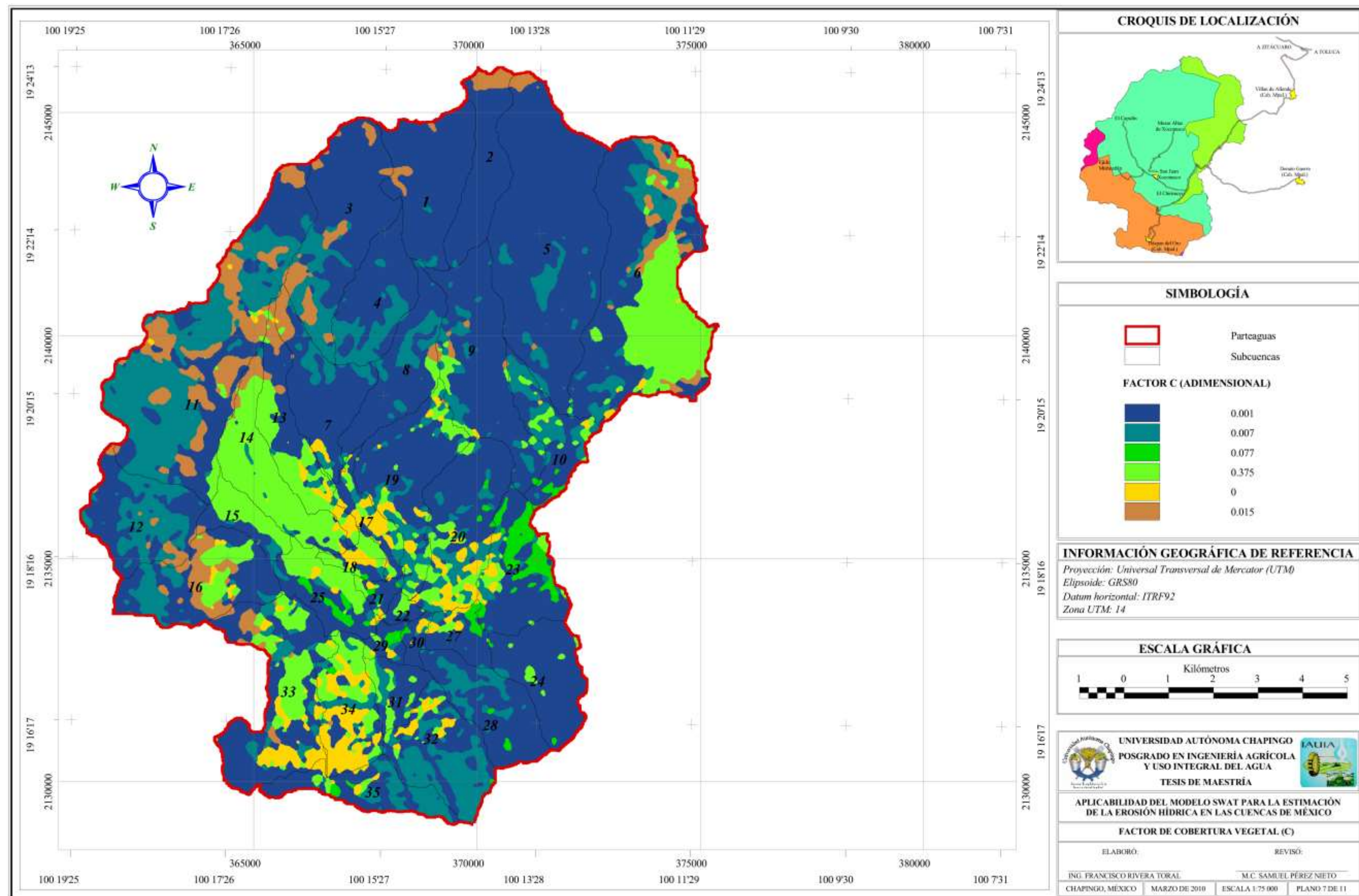
9.1. ANEXO 1: PLANOS

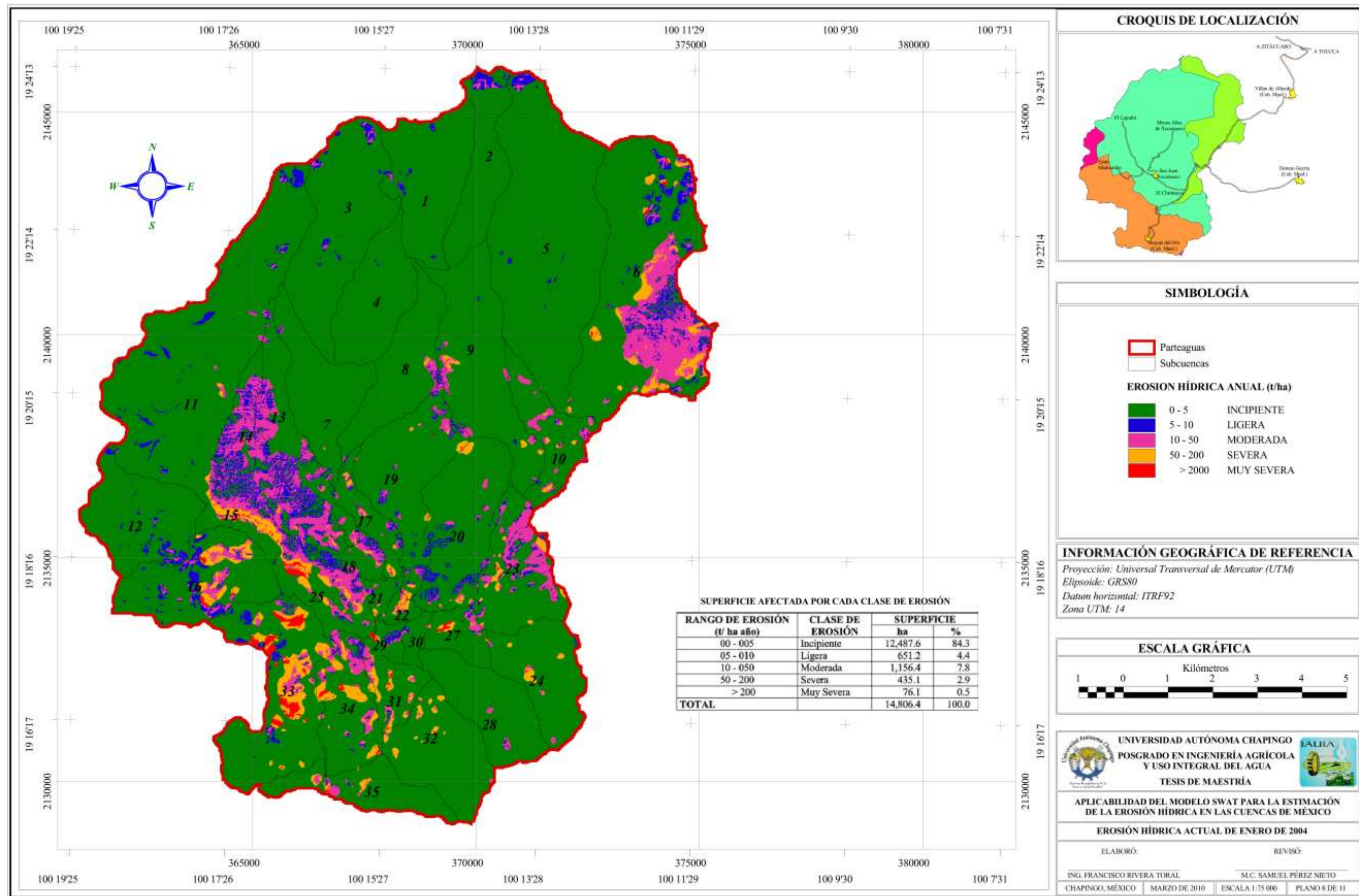


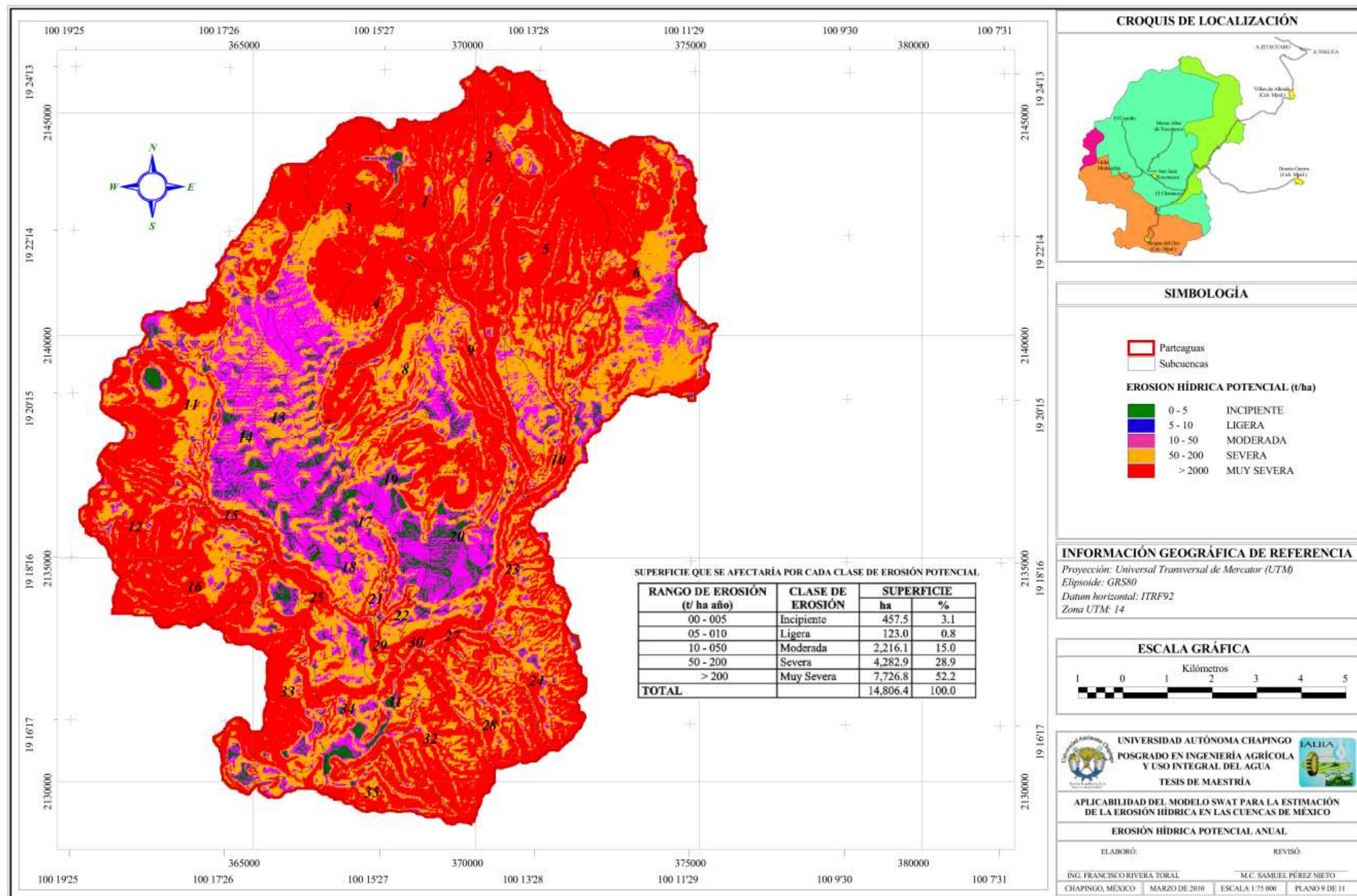


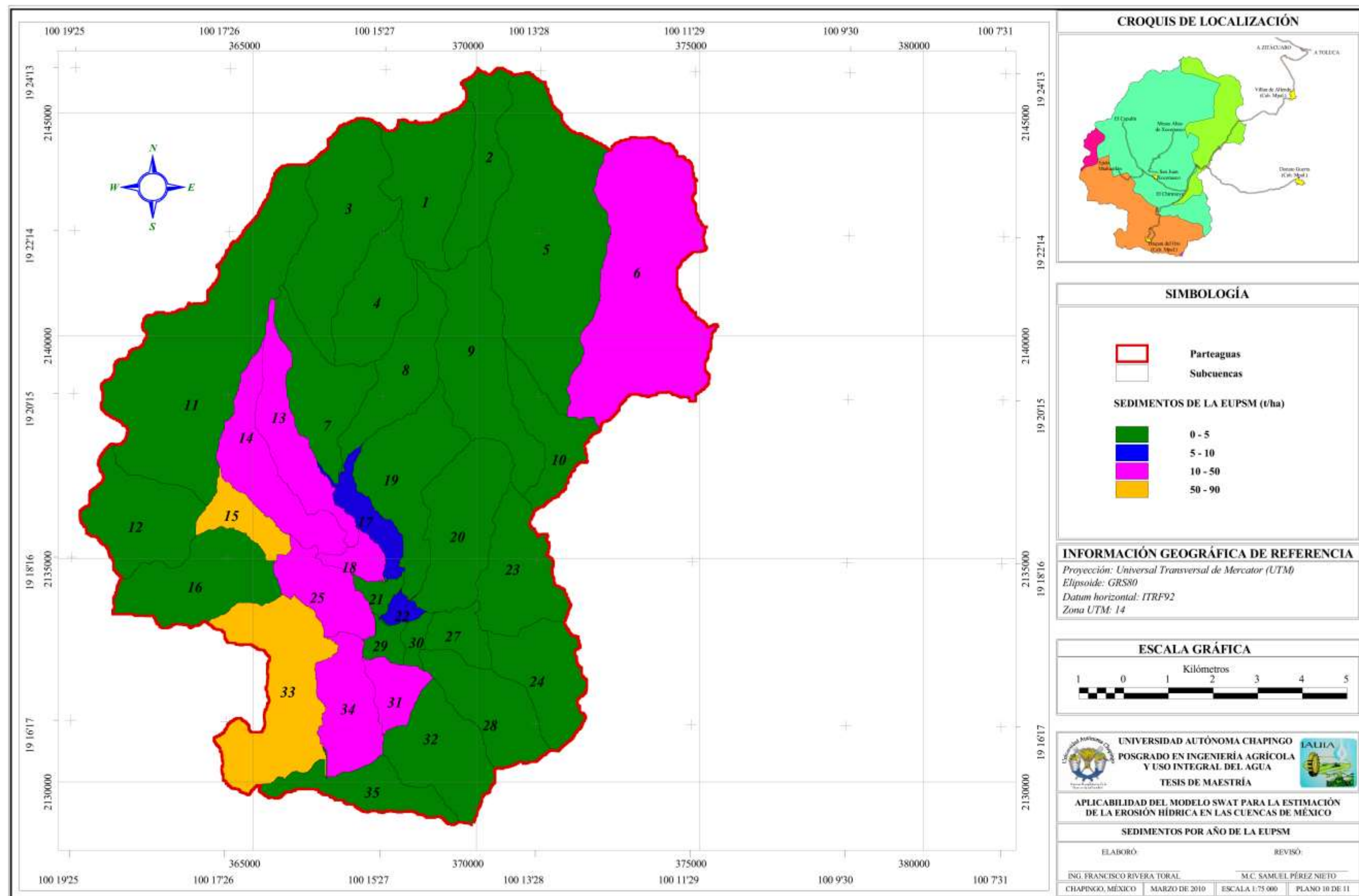


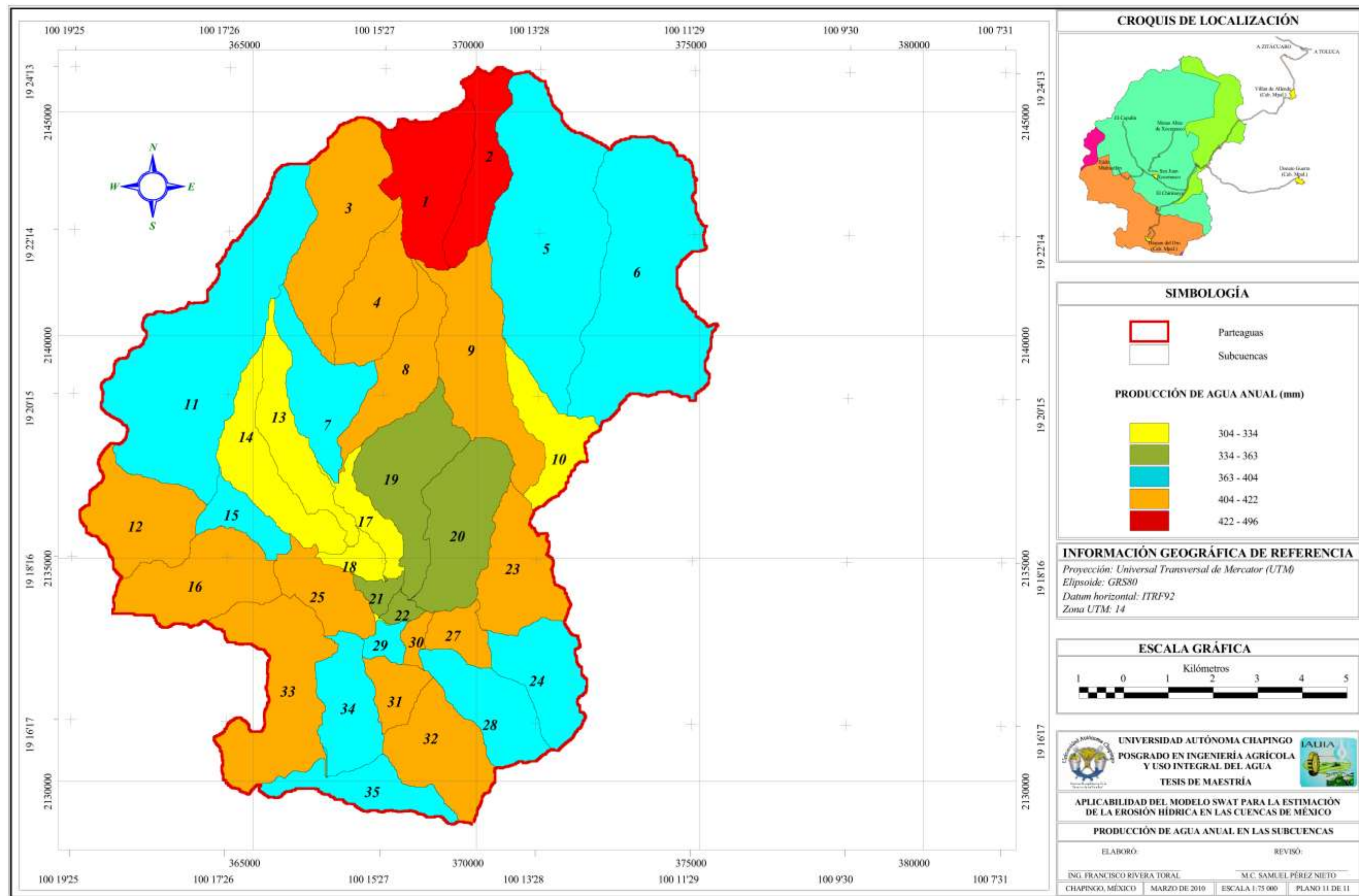












9.2. ANEXOS 2: UNIDADES DE RESPUESTA HIDOLÓGICA

Cuadro 9.1. Sedimentos y balance de cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH)

SUBCUENCA	URH	USO DEL SUELO	SUELO	ÁREA (km²)	PRECIPI-TACIÓN (mm)	EVAPOTRANS-PIRACIÓN POTENCIAL (mm)	EVAPORACI-ÓN ACTUAL (mm)	CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO (mm)	PERCOLA-CIÓN (mm)	RECARGA AL ACUIFERO (mm)	CANTIDAD DE AGUA QUE SE QUEDA EN LA ZONA RADICULAR (mm)	ESCURRIMEINTO SUPERFICAL (mm)	PÉRDIDAS EN EL CUACE (mm)	FLUJO LATERAL (mm)	FLUJO BASE (mm)	PRODUCCIÓN DE AGUA (mm)	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS (t/ha)	PÉRDIDA DE SUELO (t/ha)
					<i>PRECIP</i>	<i>PET</i>	<i>ET</i>	<i>SW</i>	<i>PERC</i>	<i>GW_RCHG</i>	<i>DA_RCHG</i>	<i>SURQ</i>	<i>TLOSS</i>	<i>LATQ</i>	<i>GW_Q</i>	<i>WYLD</i>	<i>SYLD</i>	<i>USLE</i>
1	1	PINE	S2IXT	5.060	995.990	489.587	914.242	202.452	12.250	12.087	0.480	1.111	0.015	484.856	10.240	496.193	0.006	0.067
2	1	PINE	S2IXT	3.426	995.990	489.599	914.299	202.450	12.245	12.082	0.481	1.111	0.019	484.850	10.239	496.180	0.006	0.077
3	1	PINE	S1IXT	0.859	836.715	409.951	1030.254	113.433	19.605	19.605	0.806	7.163	0.072	397.556	17.034	421.681	0.018	0.151
3	2	PINE	S2IXT	6.228	836.715	414.408	1030.254	124.024	18.163	18.163	0.745	4.665	0.061	396.673	15.788	417.064	0.020	0.178
4	1	BDPQ	S1IXT	1.133	836.715	436.590	1030.866	81.926	2.134	2.134	0.074	3.479	0.045	394.495	1.811	399.740	0.054	0.711
4	2	PINE	S1IXT	1.919	836.715	410.015	1030.866	113.388	19.582	19.582	0.802	7.154	0.061	397.527	17.010	421.631	0.023	0.171
4	3	PINE	S2IXT	0.846	836.715	414.481	1030.866	123.967	18.138	18.138	0.744	4.655	0.052	396.640	15.760	417.004	0.018	0.201
5	1	PINE	S2IXT	13.495	848.044	447.218	954.187	115.306	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	397.849	0.000	397.850	0.000	0.000
6	1	PINE	S2IXT	5.569	848.044	447.071	948.142	115.603	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	397.974	0.000	397.974	0.000	0.000
6	2	AGRT	S2IXT	7.892	848.044	450.388	948.142	32.246	8.251	8.251	0.290	32.521	0.336	360.297	6.932	399.414	47.156	72.773
7	1	FRSE	S1IXT	1.647	836.715	440.447	1016.207	137.898	61.138	61.138	2.708	11.904	0.070	318.904	54.444	385.182	0.017	0.077
7	2	FRSE	S3IXT	2.412	836.715	445.607	1016.207	148.477	48.045	48.045	2.107	40.283	0.214	298.093	42.674	380.836	0.096	0.182
8	1	PINE	S1IXT	1.632	836.715	409.244	1023.925	113.942	19.852	19.852	0.818	7.252	0.080	397.888	17.258	422.318	0.013	0.097
8	2	PINE	S2IXT	0.870	836.715	413.520	1023.925	124.582	18.484	18.484	0.758	4.782	0.067	397.080	16.086	417.881	0.011	0.114
8	3	FRSE	S1IXT	1.295	836.715	409.244	1023.925	113.942	19.852	19.852	0.818	7.252	0.080	397.888	17.258	422.318	0.012	0.097
8	4	FRSE	S2IXT	0.145	836.715	413.521	1023.925	124.580	18.483	18.483	0.758	4.782	0.070	397.080	16.087	417.878	0.009	0.114
9	1	PINE	S2IXT	3.427	836.715	413.001	1019.626	124.954	18.667	18.667	0.765	4.855	0.060	397.314	16.253	418.362	0.014	0.130
9	2	FRSE	S2IXT	3.176	836.715	413.001	1019.626	124.954	18.667	18.667	0.765	4.855	0.060	397.314	16.253	418.362	0.014	0.130
10	1	BDPQ	S2IXT	1.448	836.715	499.254	1015.741	116.940	17.748	17.748	0.757	5.184	0.066	312.268	15.616	333.001	0.046	0.462
10	2	FRSD	S2IXT	1.422	836.715	498.307	1015.741	116.925	16.014	16.014	0.678	11.286	0.091	308.848	14.059	334.103	0.016	0.082
11	1	PATZ	S1IXT	0.774	836.715	446.174	1018.514	66.641	4.036	4.036	0.143	18.020	0.131	369.645	3.493	391.027	0.448	1.790
11	2	PATZ	S2IXT	0.941	836.715	433.341	1018.514	66.738	1.302	1.302	0.040	8.244	0.075	395.430	1.127	404.725	0.278	2.075
11	3	PATZ	S3IXT	2.951	836.715	442.970	1018.514	73.659	0.828	0.828	0.027	37.630	0.260	356.355	0.754	394.480	1.656	3.372
11	4	BDPQ	S1IXT	1.507	836.715	452.281	1018.514	91.391	5.184	5.184	0.211	4.736	0.062	373.770	4.445	382.888	0.042	0.452
11	5	BDPQ	S2IXT	1.379	836.715	438.604	1018.514	83.082	1.721	1.721	0.057	1.992	0.033	394.742	1.460	398.161	0.021	0.298
11	6	BDPQ	S3IXT	6.984	836.715	453.720	1018.514	92.396	2.180	2.180	0.075	17.220	0.156	363.222	1.900	382.186	0.322	1.285
12	1	BDPQ	S3IXT	2.487	836.715	435.173	1017.794	83.097	0.535	0.535	0.017	13.610	0.072	387.741	0.461	401.739	0.327	1.799
12	2	PINE	S3IXT	2.170	836.715	410.365	1017.794	125.158	14.102	14.102	0.582	28.262	0.122	381.093	12.252	421.485	0.113	0.267
13	1	FRSE	S1IXT	0.149	836.715	481.069	1015.110	161.886	213.175	213.088	9.988	14.299	0.121	122.005	196.470	332.653	0.004	0.016

SUBCUENCA	URH	USO DEL SUELO	SUELO	ÁREA (km²)	PRECIPI-TACIÓN (mm)	EVAPOTRANS-PIRACIÓN POTENCIAL (mm)	EVAPORACI-ÓN ACTUAL (mm)	CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO (mm)	PERCOLA-CIÓN (mm)	RECARGA AL ACUIFERO (mm)	CANTIDAD DE AGUA QUE SE QUEDA EN LA ZONA RADICULAR (mm)	ESCURRIMEINTO SUPERFICAL (mm)	PÉRDIDAS EN EL CUACE (mm)	FLUJO LATERAL (mm)	FLUJO BASE (mm)	PRODUCCIÓN DE AGUA (mm)	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS (t/ha)	PÉRDIDA DE SUELO (t/ha)
					<i>PRECIP</i>	<i>PET</i>	<i>ET</i>	<i>SW</i>	<i>PERC</i>	<i>GW_RCHG</i>	<i>DA_RCHG</i>	<i>SURQ</i>	<i>TLOSS</i>	<i>LATQ</i>	<i>GW_Q</i>	<i>WYLD</i>	<i>SYLD</i>	<i>USLE</i>
13	2	FRSE	S3IXT	1.120	836.715	488.844	1015.110	177.592	177.873	177.811	8.295	51.689	0.375	111.382	163.510	326.206	0.027	0.050
13	3	AGRT	S1IXT	0.641	836.715	510.345	1015.110	148.914	123.753	123.753	5.707	95.682	0.638	101.766	113.326	310.136	11.594	15.099
13	4	AGRT	S3IXT	1.572	836.715	482.403	1015.110	135.243	99.586	99.586	4.564	164.191	0.876	86.866	90.514	340.695	32.547	23.550
14	1	AGRT	S1IXT	0.750	836.715	511.205	1013.867	153.874	132.298	132.298	6.114	96.664	0.558	90.997	121.155	308.258	10.663	13.499
14	2	AGRT	S3IXT	3.343	836.715	483.115	1013.867	138.434	106.671	106.671	4.895	165.409	0.843	77.605	97.089	339.260	29.800	20.649
15	1	FRSE	S3IXT	0.450	836.715	434.138	1011.454	141.338	33.996	33.996	1.458	36.568	0.176	327.875	29.928	394.195	0.081	0.182
15	2	AGRT	S3IXT	1.220	836.715	435.394	1011.454	62.562	7.796	7.796	0.268	121.116	0.417	274.331	6.737	401.768	117.859	102.607
16	1	FRSE	S3IXT	5.161	836.715	410.024	1014.731	125.441	14.200	14.200	0.588	28.380	0.154	381.197	12.362	421.786	0.125	0.277
17	1	FRSD	S1IXT	0.622	836.715	534.473	1009.380	154.417	66.671	66.671	2.981	24.635	0.202	205.343	59.930	289.706	0.020	0.058
17	2	URLD	S1IXT	0.524	836.715	532.796	1009.380	98.663	47.366	47.366	2.169	69.184	1.162	186.065	42.809	296.897	0.172	0.379
17	3	AGRT	S1IXT	0.374	836.715	490.197	1009.380	110.480	68.617	68.617	3.119	87.068	0.468	188.620	61.806	337.027	27.709	36.296
18	1	FRSD	S1IXT	0.211	836.715	543.660	1009.278	165.346	88.184	88.184	4.024	26.195	0.171	172.243	79.716	277.984	0.015	0.045
18	2	URLD	S1IXT	0.231	836.715	545.761	1009.278	107.656	62.804	62.804	2.888	70.874	0.943	155.280	57.206	282.417	0.136	0.282
18	3	AGRT	S1IXT	0.440	836.715	497.065	1009.278	125.477	87.963	87.963	4.043	91.135	0.393	157.186	79.863	327.791	21.489	29.145
19	1	PINE	S1IXT	2.114	836.715	439.135	1011.834	137.921	60.438	60.438	2.676	11.896	0.076	320.921	53.818	386.560	0.017	0.077
19	2	PINE	S2IXT	0.324	836.715	428.175	1011.834	135.683	32.206	32.206	1.375	7.078	0.063	365.553	28.242	400.810	0.011	0.087
19	3	FRSD	S1IXT	2.598	836.715	494.007	1011.834	117.820	18.841	18.841	0.785	16.856	0.140	304.233	16.585	337.534	0.023	0.100
19	4	FRSD	S2IXT	0.302	836.715	466.316	1011.834	98.521	5.883	5.883	0.238	7.562	0.073	356.109	5.089	368.687	0.010	0.077
20	1	PINE	S1IXT	1.550	836.715	442.418	1008.452	141.012	68.927	68.927	3.077	12.311	0.070	308.497	61.572	382.310	0.017	0.075
20	2	PINE	S2IXT	0.844	836.715	432.953	1008.452	139.607	38.741	38.741	1.672	8.043	0.060	352.973	34.152	395.109	0.014	0.098
20	3	FRSD	S1IXT	2.274	836.715	500.784	1008.452	123.414	23.495	23.495	1.007	18.265	0.137	290.963	20.679	329.770	0.025	0.101
20	4	FRSD	S2IXT	0.725	836.715	476.508	1008.452	104.554	8.494	8.494	0.344	8.511	0.072	341.894	7.347	357.680	0.013	0.088
21	1	FRSD	S1IXT	0.571	836.715	481.559	1006.122	110.660	13.696	13.696	0.564	14.973	0.088	324.261	11.963	351.109	0.018	0.101
22	1	FRSD	S1IXT	0.298	836.715	481.201	1005.525	110.547	13.618	13.618	0.561	14.946	0.077	324.732	11.890	351.492	0.018	0.106
22	2	AGRT	S1IXT	0.124	836.715	456.829	1005.525	49.978	13.868	13.868	0.526	67.910	0.213	300.549	11.895	380.142	34.882	62.698
23	1	PINE	S1IXT	1.140	836.715	407.155	1010.419	116.707	20.502	20.502	0.846	7.495	0.056	398.870	17.808	424.117	0.015	0.117
23	2	FRSD	S1IXT	1.714	836.715	433.814	1010.419	83.770	1.972	1.972	0.066	8.316	0.068	392.455	1.702	402.404	0.015	0.081
23	3	VGAR	S1IXT	1.416	836.715	428.522	1010.419	58.165	4.233	4.233	0.162	7.580	0.049	398.191	3.545	409.267	1.269	8.299
24	1	FRSD	S1IXT	1.429	836.715	433.732	1009.577	83.854	1.993	1.993	0.066	8.338	0.060	392.488	1.717	402.482	0.015	0.096
24	2	FRSD	S4IXT	2.374	836.715	431.461	1009.577	83.814	0.174	0.174	0.002	21.987	0.123	383.380	0.174	405.418	0.048	0.156
25	1	FRSD	S1IXT	0.512	836.715	440.492	1007.224	87.656	3.097	3.097	0.113	9.246	0.070	383.423	2.627	395.227	0.013	0.086
25	2	FRSD	S3IXT	0.626	836.715	439.733	1007.224	88.431	0.540	0.540	0.019	25.206	0.150	371.168	0.472	396.696	0.062	0.203

SUBCUENCA	URH	USO DEL SUELO	SUELO	ÁREA (km²)	PRECIPI- TACIÓN (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)	EVAPORACI- ÓN ACTUAL (mm)	CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO (mm)	PERCOLA- CIÓN (mm)	RECARGA AL ACUIFERO (mm)	CANTIDAD DE AGUA QUE SE QUEDA EN LA ZONA RADICULAR (mm)	ESCURRIMEINTO SUPERFICAL (mm)	PÉRDIDAS EN EL CUACE (mm)	FLUJO LATERAL (mm)	FLUJO BASE (mm)	PRODUCCIÓN DE AGUA (mm)	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS (t/ha)	PÉRDIDA DE SUELO (t/ha)
					<i>PRECIP</i>	<i>PET</i>	<i>ET</i>	<i>SW</i>	<i>PERC</i>	<i>GW_RCHG</i>	<i>DA_RCHG</i>	<i>SURQ</i>	<i>TLOSS</i>	<i>LATQ</i>	<i>GW_Q</i>	<i>WYLD</i>	<i>SYLD</i>	<i>USLE</i>
25	3	AGRT	S1IXT	0.969	836.715	428.255	1007.224	36.225	2.496	2.496	0.099	49.163	0.235	360.301	2.132	411.360	37.593	67.811
25	4	AGRT	S3IXT	0.593	836.715	413.333	1007.224	48.033	1.696	1.696	0.056	101.143	0.344	323.583	1.501	425.883	118.497	132.062
26	1	FRSD	S1IXT	0.012	836.715	510.923	1005.099	132.337	32.843	32.843	1.442	20.516	0.328	268.539	29.163	317.891	0.015	0.074
26	2	URLD	S1IXT	0.015	836.715	504.456	1005.099	80.176	21.816	21.816	0.968	65.289	1.800	245.272	19.617	328.379	0.254	0.539
27	1	PINE	S1IXT	0.577	836.715	406.228	1003.319	117.323	20.836	20.836	0.859	7.626	0.042	399.284	18.107	424.975	0.019	0.156
27	2	FRSD	S1IXT	0.829	836.715	433.164	1003.319	84.436	2.132	2.132	0.069	8.493	0.050	392.717	1.830	402.990	0.020	0.123
28	1	BDPQ	S1IXT	0.954	836.715	434.347	1005.500	84.255	2.742	2.742	0.094	3.810	0.045	395.620	2.342	401.726	0.044	0.629
28	2	FRSD	S1IXT	1.023	836.715	433.359	1005.500	84.234	2.084	2.084	0.070	8.439	0.071	392.639	1.796	402.803	0.016	0.097
28	3	FRSD	S4IXT	1.789	836.715	431.139	1005.500	84.214	0.205	0.205	0.003	22.219	0.145	383.409	0.205	405.688	0.051	0.169
29	1	FRSD	S1IXT	0.658	836.715	433.241	1004.170	84.356	2.113	2.113	0.069	8.472	0.058	392.686	1.816	402.916	0.015	0.093
30	1	PINE	S1IXT	0.249	836.715	405.930	1000.991	117.535	20.946	20.946	0.863	7.669	0.047	399.414	18.205	425.241	0.015	0.135
30	2	FRSD	S1IXT	0.274	836.715	432.951	1000.991	84.659	2.183	2.183	0.070	8.552	0.055	392.801	1.875	403.174	0.015	0.106
31	1	PINE	S1IXT	0.493	836.715	405.551	998.112	117.802	21.085	21.085	0.870	7.723	0.053	399.580	18.336	425.585	0.014	0.117
31	2	FRSD	S1IXT	0.582	836.715	432.683	998.112	84.935	2.248	2.248	0.073	8.627	0.064	392.909	1.933	403.405	0.014	0.092
31	3	AGRT	S1IXT	0.429	836.715	420.880	998.112	35.994	1.960	1.960	0.073	46.977	0.216	370.415	1.671	418.847	40.595	84.606
32	1	BDPQ	S1IXT	1.794	836.715	433.791	999.242	84.852	2.891	2.891	0.099	3.898	0.033	395.893	2.462	402.220	0.056	0.726
32	2	BDPQ	S4IXT	0.979	836.715	434.013	999.242	84.935	0.722	0.722	0.026	13.860	0.071	388.321	0.614	402.724	0.232	1.300
32	3	BDPQ	S5IXT	0.362	836.715	436.122	999.242	84.971	1.381	1.381	0.042	6.961	0.040	392.449	1.193	400.563	0.084	1.020
32	4	PINE	S1IXT	1.303	836.715	405.692	999.242	117.704	21.033	21.033	0.868	7.703	0.043	399.519	18.280	425.459	0.020	0.147
33	1	FRSD	S3IXT	3.471	836.715	431.046	1008.447	83.912	0.151	0.151	0.001	22.841	0.173	382.957	0.151	405.775	0.079	0.253
33	2	FRSD	S5IXT	0.655	836.715	435.841	1008.447	84.049	0.768	0.768	0.026	10.647	0.085	389.728	0.657	400.947	0.017	0.107
33	3	AGRT	S3IXT	3.016	836.715	407.704	1008.447	45.322	1.007	1.007	0.039	95.858	0.425	335.395	0.880	431.707	154.971	144.323
34	1	URLD	S1IXT	0.426	836.715	476.393	999.207	64.933	7.333	7.333	0.322	61.168	0.913	293.111	6.577	359.943	0.254	0.640
34	2	URLD	S3IXT	0.317	836.715	470.732	999.207	67.914	5.220	5.220	0.220	83.538	0.918	278.734	4.649	366.004	0.519	0.994
34	3	URLD	S5IXT	1.309	836.715	420.955	999.207	47.522	0.877	0.877	0.034	59.637	0.916	358.325	0.763	417.809	0.257	0.640
34	4	AGRT	S1IXT	0.880	836.715	456.123	999.207	53.721	15.944	15.944	0.624	69.701	0.312	297.101	13.702	380.192	41.970	63.077
34	5	AGRT	S3IXT	0.511	836.715	437.334	999.207	69.130	11.824	11.824	0.437	127.198	0.435	261.776	10.104	398.643	116.680	101.139
35	1	BDPQ	S5IXT	1.426	836.715	436.004	997.738	85.117	1.401	1.401	0.044	7.006	0.054	392.490	1.214	400.656	0.082	0.858
35	2	FRSD	S5IXT	1.373	836.715	434.985	997.738	85.102	0.904	0.904	0.029	11.050	0.077	389.964	0.776	401.713	0.020	0.115