



**UAEM**

Universidad Autónoma  
del Estado de México



**FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y  
REGIONAL**

**PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA SUBCUENCA  
DEL RÍO ALMOLOYA – OTZOLOTEPEC, ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

**PRESENTA:**

**ESTEBAN MAXIMILIANO SILVA TINAJERO**

**DIRECTOR DE TESIS: Dr. en C. SALVADOR ADAME MARTÍNEZ**

**Toluca, México 2023**

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	5
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	6
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b> .....	7
1.1 Suelo.....	7
1.1.1 Importancia del suelo.....	11
1.1.2 Servicios ecosistémicos del suelo.....	11
1.2 Degradación de suelos.....	14
1.2.1 Tipos de degradación del suelo.....	15
1.2.2 Erosión del suelo .....	18
1.2.2.1 Causas de la erosión de suelos .....	19
1.2.2.2 Consecuencias de la erosión de suelos .....	20
1.2.2.3 Tipos de erosión .....	22
1.2.2.4 Formas de erosión hídrica .....	24
1.2.3 Impactos de la erosión hídrica dentro y fuera del sitio .....	27
1.3 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	29
1.4 Sistemas de Información Geográfica.....	32
1.5 Obras y prácticas de conservación de suelo.....	35
1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el suelo .....	38
1.7 Conclusiones parciales.....	39
<b>CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	40
2.1 Casos internacionales .....	40
2.2 Casos nacionales .....	47
2.3 Casos estatales .....	54
2.4 Conclusiones parciales .....	63
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO</b> .....	64
3.1 Localización del área de estudio .....	64
3.2 Climas .....	65

3.3 Edafología .....	66
3.4 Uso de suelo y vegetación .....	68
3.5 Geología .....	71
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>72</b>
4.1 Calculo de erosión hídrica del suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).....	72
4.2 Factor de erosividad de la lluvia “R” .....	72
4.3 Factor de erosionabilidad del suelo “K” .....	73
4.4 Factor de la longitud y grado de pendiente “LS” .....	75
4.5 Obtención del uso de suelo y vegetación actual .....	77
4.6 Factor de cobertura vegetal “C” .....	77
4.7 Determinación de la erosión potencial y actual del suelo .....	78
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>79</b>
5.1 Factor R.....	79
5.1.1 Factor K.....	81
5.1.2 Factor LS.....	82
5.2 Uso de suelo y vegetación.....	83
5.3 Factor C .....	86
5.4 Erosión Potencial .....	87
5.5 Erosión Actual .....	88
5.6 Propuesta de obras y prácticas de conservación de suelos .....	91
5.6.1 Prácticas vegetativas .....	91
5.6.2 Prácticas mecánicas .....	92
5.7 El suelo y los ODS de la Agenda 2030 .....	94
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>99</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parcelas para experimentación .....	45
Tabla 2	Valores de C .....	56
Tabla 3	Ecuación para el Factor de erosividad de la lluvia “R” .....	73
Tabla 4	Unidades de suelo y su textura según FAO/UNESCO .....	74
Tabla 5	Clasificación de la erosión hídrica.....	78
Tabla 6	Datos de estaciones climatológicas y valores de la erosividad de la lluvia de la zona de estudio y sus inmediaciones .....	79
Tabla 7	Clases y superficie del uso de suelo y vegetación actual (2022) de la zona de estudio .....	84
Tabla 8	Valores asignados para el Factor “C” .....	86
Tabla 9	Cantidad de superficie afectada por la erosión hídrica en la zona de estudio .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Horizontes del suelo .....	8
Figura 2	Erosión por salpicamiento .....	25
Figura 3	Erosión laminar .....	26
Figura 4	Erosión en canales y canalillos .....	26
Figura 5	Cárcavas y zanjas .....	27
Figura 6	Localización de la zona de estudio .....	64
Figura 7	Climas de la zona de estudio .....	66
Figura 8	Edafología de la zona de estudio .....	67
Figura 9	Uso de suelo y vegetación de la zona de estudio .....	70
Figura 10	Geología de la zona de estudio .....	71
Figura 11	Mapa de erosividad de la lluvia Factor “R” .....	81
Figura 12	Mapa de erosionabilidad del suelo Factor “K” .....	82
Figura 13	Mapa de la longitud y grado de la pendiente Factor “LS” .....	83
Figura 14	Uso de suelo y vegetación actual (2022) .....	84
Figura 15	Mapa del factor de cobertura vegetal Factor “C” .....	87
Figura 16	Mapa de la erosión potencial del suelo .....	88
Figura 17	Mapa de la erosión actual del suelo .....	89
Figura 18	Terraza individual .....	93



## INTRODUCCIÓN

El suelo es considerado un recurso natural que adquiere un papel importante en el medio ambiente por la cantidad funciones ambientales que provee, como puede ser la fijación de carbono, el hábitat de la vida, soporte de las actividades humanas, fuente de materia primas, entre otros aspectos.

Sin embargo, el suelo se puede degradar y perder su capacidad de producción de bienes o servicios. En la degradación del suelo, se observan, dos aspectos importantes: Primero disminuye la capacidad productiva de un ecosistema y Segundo provoca cambios climáticos globales a través de alteraciones en los balances de agua y energía y rompe los ciclos de carbón, nitrógeno, sulfuro y otros elementos. La degradación continuamente impacta la productividad agrícola y al medio ambiente, propicia inestabilidad política y social, aumenta la tasa de deforestación, acelera la erosión del suelo y provoca la contaminación de ríos y cuerpos de agua (Lal & Sewart, 1990).

Una forma de degradación es la erosión hídrica, ocasionada por las gotas de lluvia que dispersan los agregados del suelo como resultado del impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie de terrenos desprovista de vegetación, induciendo que el material fino en suspensión sea transportado por salpicamiento y las aguas de escurrimiento fuera de las parcelas y en las partes bajas de las cuencas se deposita, obstruyendo e inundando las partes planas o llanas con los elementos nutritivos del suelo.

En el presente trabajo de investigación se estimó la pérdida de suelo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés) en la subcuenca del Río Almoloya - Oztolotepec localizada en la zona centro-oriente del Estado de México. Está conformada por varios municipios entre lo que sobresalen: Toluca (parte), Metepec, Calimaya, Tenango del Valle, San Mateo Atenco, Lerma y Ocoyoacac, entre otros.

Se trata de una subcuenca con un relieve accidentado principalmente y en la parte plana se existe una competencia de uso entre las actividades agrícolas y la urbanización, principalmente.

En este estudio se emplea la RUSLE y ejecutada en el software Arc GIS 10.6.1 utilizando en su mayoría capas en formato ráster para la obtención de los factores de la ecuación como es la erosividad de la lluvia “*R*”, erosionabilidad del suelo “*K*”, longitud y grado de la pendiente “*LS*” y la cobertura vegetal del suelo “*C*”. Para cada uno de los factores se elaboró su respectivo mapa. Cabe señalar que para calcular el factor *K* o erosionabilidad del suelo se empleó la metodología FAO-UNESCO.

Con respecto al factor “*C*”, referido a la cobertura vegetal de suelo, fue necesario en primera instancia elaborar el mapa de uso de suelo y vegetación a través de una clasificación supervisada de imágenes del satélite Landsat 8 obtenidas del servicio Earth Explorer del gobierno de los Estados Unidos de América.

Cada uno de los factores fueron trabajados en formato ráster para después ser multiplicados en la calculadora ráster para obtener los mapas de erosión potencial y actual expresados en ton/ha/año. Igualmente se utilizó el sistema de clasificación de erosión de la FAO que divide el grado de erosión en ninguna, ligera, moderada, alta y muy alta, dependiendo de la cantidad de pérdida de suelo.

Finalmente, de esta manera se generaron los mapas de erosión potencial y actual del suelo en la zona de estudio, con ello fue factible localizar las zonas con diferentes niveles o grados de pérdidas de suelo. Con base a ello se establecieron una serie de recomendaciones sobre obras y prácticas de conservación de suelos.

## **JUSTIFICACIÓN**

De acuerdo con la SEMARNAT, (2015) la degradación del suelo en México es del 64%, debido principalmente a las actividades agrícolas y ganaderas, siendo la erosión del suelo la que destaca. Igualmente, y de acuerdo con los datos oficiales la erosión leve es la que predomina con el 63%, siguiéndola la moderada.

La subcuenca del Río Almoloya – Oztolotepec al estar ubicada en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y llegar a extenderse hasta el territorio de la Ciudad de México posee zonas con relieves escarpados y altas pendientes ya sea en las faldas del Nevado de Toluca o en la Sierra de las Cruces, además el uso de suelo que predomina es el agrícola, sobre todo de temporal, estas condiciones favorecen para que la subcuenca sea susceptible a la erosión hídrica en cualquiera de sus formas.

Por otro lado, los estudios sobre la degradación del suelo comenzaron a mediados del siglo pasado con base a metodologías diferentes por lo que resulta un tanto complicado realizar comparaciones de las estimaciones de pérdida de suelo ya que difieren significativamente, esto implica no tener un estudio confiable sobre los cambios ocurridos a través del tiempo con respecto a la afectación de la superficie nacional.

Por lo anterior, es necesario realizar estudios o estimaciones relacionados con las pérdidas de suelo, a diferentes niveles, para conocer la condición en la que se encuentran afectados los suelos y de esta manera estar en posibilidad de elaborar un programa de conservación o restauración de suelos.

El medir la pérdida de suelo por erosión, en este caso hídrica, es un método que requiere tiempo y altos costos económicos por lo que una forma alternativa es estimar la erosión a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés).

La RUSLE es un método adecuado y pertinente para las condiciones geográficas de México para calcular la pérdida del suelo por erosión hídrica en



sus formas laminar y canalillos, y de esta forma proponer una serie de obras y prácticas de conservación del suelo y del agua (Pedraza Villafaña, 2015).

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La abrupta topografía, las altas precipitaciones y la intervención humana (tala de bosques y prácticas agrícolas inadecuadas) generan anualmente una importante pérdida de suelo en la zona correspondiente a la Subcuenca del Río Almoloya – Oztolotepec, el proceso de erosión se presenta de forma natural dadas las características de la zona donde se encuentran fuertes pendientes y donde ocurren anualmente altas intensidades de precipitación (Hernández Téllez, García Aragón, Quentin, & Díaz Delgado, 2009).

De acuerdo con De La Cruz Jasso, Hernández Téllez, Balderas Plata, & Franco Plata (2011) algunos de los municipios más afectados por la erosión hídrica en la zona de estudio son los de Oztolotepec, Xonacatlán y Lerma para los cuales es necesario implementar estrategias de manejo y conservación de suelo.

Si las pérdidas de suelo son muy altas el suelo pierde su capacidad de brindar servicios ecosistémicos como lo es su participación en los ciclos biogeoquímicos, esto conlleva a problemas socioambientales serios principalmente la escases de agua en cantidad y calidad, la disminución de la producción agrícola lo cual a su vez pone en riesgo la seguridad alimentaria y la disminución de la capacidad para soportar ecosistemas y biodiversidad terrestre.

Un estudio sobre erosión hídrica y pérdidas de suelo para el área de estudio fue elaborado por el Gobierno del Estado de México (2008) sin embargo, una debilidad de este es la escala y la generalidad con la que fue elaborado, por lo que es necesario llevar a cabo estudios a escalas más pequeñas y con metodologías apropiadas como lo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés).

## **OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **Objetivo general**

Evaluar las pérdidas de suelo por erosión hídrica en la Subcuenca Río Almoloya – Oztolotepec utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada para dar recomendaciones de prácticas de conservación de suelos.

### **Objetivos específicos:**

- 1) Elaborar el Marco Teórico Conceptual sobre la degradación del suelo.
- 2) Elaborar el Marco de Referencia sobre estudios similares en diferentes ámbitos geográficos.
- 3) Calcular la pérdida de suelo utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada.
- 4) Calcular el factor R con base a la metodología de Cortes y el factor K de acuerdo con FAO-UNESCO.
- 5) Dar recomendaciones de prácticas y obras de conservación del suelo y agua en la zona de estudio.

### **Hipótesis**

La hipótesis planteada en el presente trabajo de investigación es:

Estimar las pérdidas de suelo utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada en un Sistema de Información Geográfica permitirá conocer el grado de erosión y las zonas más afectadas por este proceso físico.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

En este capítulo se abordan conceptos y definiciones sobre el suelo, sus componentes, su importancia ambiental, así como sus principales problemáticas en cuestión de sus formas de degradación (erosión). El proceso de degradación del suelo tiene una serie de impactos tanto ambientales como socioeconómicos.

### **1.1 Suelo**

La definición de suelo depende de la disciplina científica de interés que se involucra con él.

Según (SEMARNAT, 2012) desde una visión geotécnica, es el material sin consolidar que se encuentra sobre el lecho rocoso. Para la ingeniería civil es el material sobre el que se construye y excava, siendo sus propiedades determinantes para el tipo y características de la obra a construirse. Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua. Desde una perspectiva ambiental, existen varias definiciones que incorporan su papel fundamental en los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realiza tales como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes.

De acuerdo con el ICGC (2019) el suelo es la capa superior de la corteza terrestre que está compuesta por una mezcla de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos lo que conforma un medio ambiente muy complejo y variable. En concreto el suelo es el producto final de la influencia del tiempo en combinación con el clima, la topografía, organismos (flora, fauna y ser humano) y de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Teniendo como resultado un cuerpo natural tridimensional dividido en capas (horizontes) que difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2023).

El suelo se extiende tanto en superficie como en profundidad y consta de varias capas llamadas horizontes (Figura 1), aproximadamente paralelas a la

superficie. Cada uno de los horizontes del suelo tiene distintas propiedades físicas y químicas, lo que se refleja en su aspecto. Al conjunto de horizontes de un suelo se le llama perfil, el perfil de un suelo se puede observar en un corte de caminos o en una barranca (INIA, 2015).

De acuerdo con Ibáñez (2008) los horizontes del suelo son:

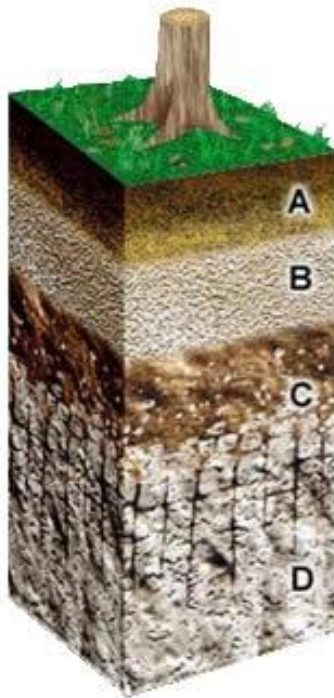
*Horizonte A.* Capa superior, más oscura y fértil, con más raíces. Es la capa arable del suelo.

*Horizonte B.* Capa más arcillosa, menos fértil y con menos raíces.

*Horizonte C.* Capa más profunda. Prácticamente sin raíces.

*Horizonte D.* La roca madre o material parental poco o no alterada.

Figura 1. Horizontes del suelo



Fuente: (Ibáñez, 2008)

## *Componentes básicos del suelo*

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre que fue formada lentamente por la acción combinada del tiempo, el clima, la roca madre o material parental, el relieve y la materia orgánica.

Los suelos constituyen una cubierta delgada en la superficie terrestre, de unos pocos centímetros a varios metros. Como cuerpo natural, el suelo constituye una interfase que permite intercambios entre la litosfera, la biosfera y la atmósfera (Porta, López Acevedo, & Poch, 2014).

De acuerdo con el INECC (2007) el suelo es una mezcla compleja de materiales inorgánicos (fracción mineral, formada principalmente de arcillas, limo y arena; fracción de la materia orgánica; la fracción de agua/aire y la de los organismos vivos. A continuación, se hace una descripción de cada una de estas fracciones:

*Fracción mineral.* Los componentes minerales constituyen la mayor parte de la estructura de un suelo. En orden de abundancia, los elementos más comúnmente encontrados en los minerales son:  $O > Si > Al > Fe > C > Ca > K > Na > Mg > Ti$ . Los minerales se dividen en primarios y secundarios; los primeros se encuentran constituidos principalmente por O y Si y forman silicatos de estructuras Si-O (grava y arena). Los minerales secundarios, provenientes de procesos de disolución y precipitación, son de suma importancia debido a su superficie de reacción, y a que sirven como depósitos de agua, nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere la parte activa de un suelo (arcillas).

*Fracción orgánica.* La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, además de cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus. La fracción orgánica en un suelo puede ser muy variable: un suelo árido puede contener cerca de 0.5%, mientras que una turba puede tener alrededor de 95%; sin embargo, la mayoría de los suelos, en general, tiene un contenido de materia orgánica entre 0.5 y 5%.

*Fracción agua/gases.* Los espacios, o poros, que hay entre partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) del suelo, contienen diversas cantidades de dos componentes inorgánicos clave: el agua y el aire. El agua es el principal componente líquido de los suelos y contiene sustancias minerales, oxígeno (O<sub>2</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en disolución, mientras que la fase gaseosa en los suelos está constituida por aire. Dependiendo del contenido de humedad del suelo, los poros se encontrarán ocupados por agua o por aire.

En general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas.

Por su parte, Maldonado (2018) menciona que un suelo ideal tiene cuatro grupos de componentes:

- 45% de materia mineral. Material sólido inorgánico como fragmentos de roca, metales y cristales.
- 5 % de materia orgánica. Microorganismos, restos de plantas (hojas, tallos, frutos y flores), restos de animales y materia fecal.
- 25% de agua. El agua se dispone en los espacios vacíos de las partículas de los suelos que se conocen como poros y su capacidad para retenerla dependerá de la textura del suelo.
- 25% de aire. El aire puede ocupar el mismo espacio que el agua en los poros y es fundamental para la respiración de microorganismos y raíces de plantas. Los principales gases en el suelo son el oxígeno, dióxido de carbono y el nitrógeno.

### **1.1.1 Importancia del suelo**

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que posee diversas funciones ambientales y ecosistémicas. A manera de ejemplo, se puede mencionar su participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, agua, nitrógeno, fósforo, entre otros., que continuamente y por efecto de la energía disponible pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta. No obstante, lo más conocido es que el suelo es el asiento natural para la producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad mundial (Burbano Orjuela, 2016).

Durante millones de años, los suelos han sido la base para la vegetación y los ecosistemas terrestres. El suelo es un componente importante de los bosques y los ecosistemas forestales puesto que ayuda a regular importantes procesos ecosistémicos, como la absorción de nutrientes, la descomposición y la disponibilidad de agua. Los suelos proporcionan anclaje, agua y nutrientes a los árboles. A su vez, los árboles y otras plantas y tipos de vegetación son un factor importante en la creación de un nuevo suelo cuando las hojas y la vegetación se deterioran y descomponen (FAO, 2015).

Al degradarse el suelo pierde simultáneamente la mayoría de sus propiedades y al ser un recurso natural no renovable debido a su gran tiempo de generación natural éste queda incapacitado para seguir brindando sus servicios.

### **1.1.2 Servicios ecosistémicos del suelo**

Los servicios que presta el suelo están estrechamente relacionados con la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y el paisaje.

La fijación de carbono, la biodiversidad y la conservación del suelo son importantes servicios de los ecosistemas los cuales dependen en gran medida del uso del suelo, material parental, paisaje y tipo de suelo. Además, los servicios de los ecosistemas son proporcionados por procesos biológicos, químicos y geológicos que funcionan en diversas escalas. (López Ulloa, 2016)



### *1) Captura y fijación de carbono*

Se estima que las reservas de carbono orgánico del suelo constituyen las dos terceras partes de las reservas de carbono terrestre. Además, se conoce que, con el cambio del uso de los suelos, se ha perdido gran cantidad de este elemento, que ha sido emitido a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, lo que contribuye, en gran medida, al enriquecimiento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y en consecuencia al cambio climático global. Por otra parte, el carbono orgánico del suelo es importante ya que como parte de la materia orgánica influye en las propiedades del suelo como la estructura, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad aparente, la porosidad y la infiltración. (Bojórquez Serrano, Castillo Pacheco, Hernández Jiménez, García Paredes, & Madueño Molina, 2015)

### *2) Almacenamiento y distribución de agua*

Los suelos funcionales desempeñan un papel clave en el abastecimiento de agua limpia y en la resiliencia ante las inundaciones y sequías. La infiltración de agua a través del suelo atrapa los contaminantes e impide que estos se filtren en el agua freática. Además, el suelo captura y almacena agua, poniéndola a disposición de los cultivos para su absorción; de este modo, reduce al mínimo la superficie de evaporación y maximiza la eficacia y productividad en el uso del agua. Los suelos sanos con una elevada cantidad de materia orgánica tienen capacidad para almacenar grandes volúmenes de agua. Esto es beneficioso no solo durante las sequías, cuando la humedad de los suelos es crucial para el crecimiento de los cultivos, sino también durante las lluvias intensas porque el suelo reduce las inundaciones y la escorrentía y ralentiza el vertido de agua a los arroyos (FAO, 2015).

### *3) Producción de alimentos y de biomasa*

La función más universalmente reconocida del suelo es su apoyo a la producción alimentaria. Es la base para la agricultura y el medio en el que crecen casi todas las plantas de las que obtenemos alimentos. De hecho,

se estima que el 95% de nuestros alimentos se produce directa o indirectamente en nuestros suelos. Los suelos sanos suministran los nutrientes esenciales, agua, oxígeno y el soporte para las raíces que nuestras plantas productoras de alimentos necesitan para crecer y prosperar (FAO, 2015).

#### *4) Reserva de biodiversidad*

El suelo es uno de los ecosistemas más complejos de la naturaleza y uno de los hábitats más diversos de la tierra: alberga una infinidad de organismos diferentes que interactúan entre sí y contribuyen a los ciclos globales que hacen posible la vida. No hay ningún lugar de la naturaleza con una mayor concentración de especies que los suelos; sin embargo, esta biodiversidad apenas se conoce al estar bajo tierra y ser, en gran medida, invisible para el ojo humano (FAO, 2015).

Por otro lado, Porta, López Acevedo & Poch (2014) señala que entre las principales funciones de los suelos se encuentran las siguientes:

- Hacer posible la producción de biomasa: alimentos, forrajes, fibras, biocombustibles, masas forestales, lo que se debe conseguir sin que el suelo pierda sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).
- Mantener y mejorar la calidad de las aguas que lo atraviesan: al controlar el filtrado, los intercambios iónicos, el almacenamiento y posible transferencia a otro compartimento ambiental (filtro ambiental).
- Atenuar los contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental)
- Regular el ciclo hidrológico: al controlar la entrada de agua en el suelo (infiltración), el almacenamiento y la transferencia de agua.
- Transformar las sustancias que recibe (biorreactor): evolución de la materia orgánica.

- Fijar gases de efecto invernadero: secuestro de carbono, al retener cantidades importantes de materia orgánica durante mucho tiempo.
- Regular el microclima, al absorber la radiación solar e intervenir en la evaporación.
- Constituir un hábitat biológico y reserva genética al ser un medio poroso en el que vive una gran cantidad de organismos y en el que se conservan muchas semillas (reserva de biodiversidad).
- Servir de soporte físico de actividades humanas: viviendas, industrias, infraestructuras lineales, conducciones entenadas, etc.
- Ser una fuente de materias primas: arcilla, grava, arena, yeso, caliza, turba, aluminio, hierro, entre otros.
- Mantener el paisaje, que vendrá determinado por los suelos que existan en cada ámbito geográfico.
- Proteger restos arqueológicos y proporcionar información acerca del pasado (registro de actividades).
- Proporcionar información geológica y geomorfológica

## **1.2 Degradación de suelos**

La degradación de los suelos se refiere básicamente a los procesos desencadenados por las actividades humanas que reducen su capacidad actual y/o futura capacidad para sostener ecosistemas naturales o manejados, para mantener o mejorar la calidad del aire y agua, y para preservar la salud humana. (SEMARNAT, 2002).

Según, Sánchez (2013) la degradación del suelo se puede entender como la pérdida de equilibrio de sus propiedades, lo que limita su productividad. Ella tiene expresión en aspectos físicos (erosión), químicos (déficit de nutrientes, acidez, salinidad, otros) y biológicos del suelo (deficiencia de materia orgánica).

Para Piscitelli (2015) la degradación de suelos representa un cambio en el estado de este, pero este cambio resulta en una disminución de su capacidad inicial para proveer bienes y servicios.

El DDESyMA (2017) menciona que la degradación del suelo es un proceso degenerativo que reduce la capacidad actual o futura de los suelos para seguir desempeñando sus funciones características. Esto puede obedecer tanto a causas naturales como a causas antrópicas.

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (FAO, 2021).

A manera de resumen se puede concluir que las definiciones anteriores en general concuerdan que la degradación de suelos es un cambio de estado de éste y donde se puede afectar algunas de sus propiedades ya sean físicas, químicas o biológicas lo cual conlleva a la pérdida de su productividad y a una disminución para la producción de bienes y servicios a un ecosistema.

### **1.2.1 Tipos de degradación de suelo**

Existen diversas clasificaciones de la degradación del suelo, a saber:

Por ejemplo, Barahona (s/f) señala que la degradación se divide en: Química, física, biológica, erosión hídrica y eólica. Mientras que, para Moncada de la Fuente, Anaya Garduño, Ortiz Solorio, Sánchez García, & Chacón Rodríguez, (2013) reportan que los tipos de degradación son: erosión hídrica, erosión eólica, degradación química y degradación física.

Autores como Vergara Sánchez (s/f) clasifican la degradación del suelo en: física, química y biológica, y señala que:

La *degradación química* se refiere a la pérdida de nutrientes, acidificación, salinización, sodificación, aumento de la toxicidad por liberación o

concentración de determinados elementos químicos. Además, el lavado excesivo de bases en suelos con arcillas de baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) causando una declinación en el pH del suelo y desbalances acumulando elementos tóxicos y teniendo carencias de otros necesarios.

La *degradación física* es la pérdida de estructura, aumento de la densidad aparente, disminución de la permeabilidad y la disminución de la capacidad de retención de agua. El daño físico se produce principalmente debido a la compactación que sufre el suelo, ya sea por el uso continuo de maquinaria pesada o el pisoteo de ganado. La compactación y el encostramiento son manifestaciones de la degradación física del suelo esto es causado por un aumento en la densidad del suelo por la eliminación o reducción de los poros estructurales tanto por causas naturales como humanas. Los suelos compactados y con formaciones de costras hacen difícil la labranza, dificultan el crecimiento de las raíces y la penetración del agua.

En otras ocasiones se habla de *degradación biológica* cuando se produce una reducción en el contenido de materia orgánica, la declinación en el carbono orgánico y el decremento de la actividad y diversidad de los organismos del suelo ya que todo esto permite el reciclamiento de nutrientes, la descomposición de residuos, la desintoxicación de compuestos contaminantes en el ambiente y la formación de agregados.

Por otra parte, para el caso de la degradación cuyos agentes son la acción del agua o del viento los materiales de las capas superficiales van siendo arrastrados. Si el agente es el agua se habla de *erosión hídrica* y para el caso del viento se denomina *erosión eólica*.

La erosión eólica es una forma de degradación que afecta los aspectos físicos, químicos y biológicos, cuyo principal agente causal es el viento (Encina Rojas & Ibarra, s/f).

De acuerdo con (Morgan, 2005) el factor principal en la erosión eólica es la velocidad del aire en movimiento. Debido a la aspereza impartida por tierra, piedras, vegetación y otros obstáculos, la velocidad del viento es más baja cerca de la superficie del suelo. Una vez en movimiento, el

transporte de partículas de suelo y arena por el viento se produce en suspensión, fluencia superficial y saltación. La suspensión describe el movimiento de partículas finas, generalmente menos de 0.2 mm de diámetro, alto en el aire y sobre largas distancias. La fluencia superficial es el balanceo de granos gruesos a lo largo de la superficie del suelo. La saltación es el proceso de movimiento del grano en una serie de saltos. Inicialmente, las fuerzas de arrastre y sustentación hacen que una partícula se eleve con una velocidad de eyección vertical que es aproximadamente el doble de la velocidad del viento.

Mientras que la *erosión hídrica* del suelo está íntimamente relacionada con los caminos que toma el agua en su movimiento a través de la cubierta vegetal y sobre la superficie del suelo (Morgan, 2005) la cual transporta las partículas sueltas del suelo corriente abajo por las pendientes y la acción de la gravedad.

Las partículas desprendidas son arrastradas pendiente abajo por el escurrimiento superficial, lo cual produce, a su vez, el desprendimiento de nuevo material. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos) que se mueve con una velocidad mayor y es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos (Gaitán y otros, 2017).

Cabe señalar que de acuerdo con los autores en general la degradación del suelo se clasifica en física, química y biológica. Las causas de esta tienen principalmente un origen antrópico.

Finalmente, alrededor de 2,000 millones de hectáreas de suelo, equivalentes al 15% de la superficie de tierra del planeta (una superficie más extensa que Estados Unidos y México juntos), se han degradado por causa de las actividades humanas. Los principales tipos de degradación del suelo son la erosión hídrica (56%), la erosión eólica (28%), la degradación química (12%) y la degradación física (4%); más de 1,200 millones de habitantes afectados (Moncada de la Fuente, Anaya Garduño, Ortiz Solorio, Sánchez García, & Chacón Rodríguez, 2013).

## 1.2.2 Erosión del Suelo

A continuación, se presenta una serie de conceptos sobre la erosión del suelo:

Kirkby y Morgan (1984) mencionan que la erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento y agua.

La erosión del suelo se define en términos generales como la eliminación acelerada de la capa superior del suelo de la superficie de la tierra por agua, el viento o la labranza (FAO, s/f). El INEGI (2014) reporta que la palabra erosión proviene del latín “erosio” que significa: el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos como el viento y el agua y que son acelerados por la acción del hombre.

La erosión del suelo consiste en la remoción, arranque y transporte de los materiales que constituyen la capa más superficial del suelo, sea cual sea el agente responsable: agua, viento, hielo, actuaciones humanas, etc. Como resultado de los procesos erosivos, el suelo manifiesta un descenso neto de su fertilidad natural y productividad biológica. La erosión produce la reducción del espesor efectivo del perfil edáfico y, por tanto, del volumen de suelo explotable por la vegetación o el cultivo (Alba Alonso, Alcázar Torralba, Carreño Martín, & Barbero Abolafio, 2011).

Por su parte, Hernández Martínez (s/f) señala que la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento; puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

La erosión de suelos constituye un proceso dinámico complejo que ocasiona el deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, pérdida de nutrientes, reducción de la productividad agrícola y eleva los costos de producción (Cotler, Corona, & Galeana Pizaña, 2020).

Finalmente, y de acuerdo con las definiciones reportadas se puede concluir que los autores concuerdan con que la erosión se refiere al desprendimiento, arrastre y deposición de las partículas del suelo causado por agentes como el agua o el

viento. Este proceso es acelerado por la acción humana y tiene implicaciones de tipo ambiental y socioeconómico debido a la pérdida de productividad y a la capacidad de soportar ecosistemas.

### **1.2.2.1 Causas de la erosión de suelos**

Uno de los principales procesos de degradación del suelo lo constituye la erosión, principalmente hídrica. Tan es así que afecta alrededor de 80% de la superficie de suelos agrícolas en el mundo (Pimentel & Kounang, 1998).

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 (González Mateos, y otros, 2007). Sin embargo, estas causas tienen su origen en el ámbito social, económico y político, especialmente en las zonas rurales de pequeñas explotaciones que, de acuerdo con Contreras Hinojosa y otros (2003) tienen relación con:

- a) La escasa disponibilidad de tierra, aunado a la presencia de suelos de pobre calidad (delgados con 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.



### **1.2.2.2 Consecuencias de la erosión de suelos**

En este apartado se describen las consecuencias más significativas que tiene la erosión del suelo en aspectos ambientales y socioeconómicos.

La erosión del suelo disminuye la productividad agrícola, degrada las funciones de los ecosistemas, amplifica el riesgo hidrogeológico, como los deslizamientos de tierra o las inundaciones, causa pérdidas significativas de biodiversidad, daña la infraestructura urbana y en casos graves conduce al desplazamiento de las poblaciones humanas (FAO, 2015).

#### *Disminución de la productividad agrícola*

Al disminuir los nutrientes disponibles para las plantas, así como el espacio para desarrollar las raíces, la erosión del suelo puede reducir el rendimiento agrícola hasta en un 50%. Además, los cultivos tienden a ser de menor calidad: deformes, más pequeños y menos nutritivos. Este producto de escasa calidad tiene consecuencias no sólo para los agricultores que tratan de venderlo, sino también en las personas que obtendrán menos nutrientes al consumirlo. (FAO, 2019)

#### *Seguridad Alimentaria*

La erosión del suelo y la degradación de la tierra representan una grave amenaza para la seguridad alimentaria mundial y para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), debido a que el 95% de los alimentos que consumimos provienen del suelo de no realizar acciones de gestión sostenible del suelo se compromete el bienestar de al menos 3.200 millones de personas en todo el mundo. (FAO, 2015)

#### *Aumento de riesgos hidrogeológicos*

La erosión hídrica está en aumento y en ocasiones presenta consecuencias desastrosas como inundaciones, deslizamientos de tierra, sedimentaciones, sequías, etc. Estos procesos están frecuentemente asociados a cambios desfavorables en los procesos hidrológicos

responsables del balance de agua y régimen hídrico de los suelos, derivados principalmente de cambios en el uso y manejo de las tierras y de cambios climáticos (Pla Sentís, 2011).

#### *Aumento de inundaciones*

La erosión es un fenómeno natural que causa la pérdida de terreno. Sus efectos aumentan con la inclinación del terreno. Su consecuencia final es la sedimentación, acumulación de partículas de suelo en el fondo de los cuerpos de agua el sedimento que se acumula en los embalses reduce su vida útil y aumenta la incidencia de inundaciones. La diferencia en el potencial de erosión relativo del terreno causado por el cambio en la topografía y el uso de suelo por construcciones se convierte en un factor que influye en el aumento en inundaciones (Santiago Alverio & Rodríguez, 2014).

#### *Pérdida de biodiversidad*

La erosión hídrica constituye un problema ambiental mayor. La pérdida de suelo, recurso limitado, ocasiona una disminución de su potencial biológico y productivo y por otro lado incrementa el empobrecimiento y fragilización de los geosistemas. La conjunción de ambas formas de degradación puede conducir a la ruptura del equilibrio geoecológico y desembocar en la desertificación del territorio (López Bermúdez & Romero Díaz, 1998).

Por su parte, García Fayos (2004) señalan que los procesos de erosión alteran o eliminan la superficie del suelo, que es donde se produce el establecimiento de las plántulas y donde reside gran parte de la reserva de agua y nutrientes. Bajo ese prisma, la erosión hídrica puede verse como una fuerza ecológica capaz de modificar la composición de la vegetación y su patrón espacial afectando así la cadena trófica en diferentes ecosistemas.

### *Daño a infraestructura urbana*

El ritmo acelerado de la urbanización está exacerbando los serios problemas ambientales que ya se encuentran de las ciudades de América Latina y El Caribe. Los pobres urbanos que residen en terrenos marginales y ambientalmente sensibles, están más expuestos a los peligros ambientales como, por ejemplo: Los derrumbes de tierras en Caracas que ocurren con más frecuencia en las laderas con mayor pendiente, donde habita gente pobre. La expansión urbana ha dañado las tierras en las zonas metropolitanas. La conversión de espacios libres y terrenos agrícolas en zonas urbanas altamente pobladas reduce las áreas permeables al agua, altera los patrones de drenaje natural y causa serios problemas de inundaciones, sedimentación en los sistemas de drenaje urbanos y daños estructurales en el mobiliario urbano en varias ciudades, Sao Paulo es un ejemplo de esta situación (Sorensen, Berzetti, Keipi, & Williams, 1998).

#### **1.2.2.3 Tipos de Erosión**

La erosión del suelo es un proceso físico que siempre se ha presentado en la Tierra y es el responsable de la modelación del relieve terrestre y que toma cientos o miles de años, Sin embargo, el otro tipo de erosión que tiene lugar en lapsos de tiempo relativamente cortos.

*a) Geológica, normal o natural:* Es aquella que ocurre como consecuencia de las fuerzas de la naturaleza.

*b) Erosión inducida o acelerada:* Es aquella que se presenta cuando a la acción de los agentes naturales se le agrega la acción del hombre. Este tipo de erosión es propiciada por el mal manejo del suelo y en términos generales es más rápida que la geológica.

Estos dos grandes tipos de erosión son contrastantes. La diferenciación que de ellos se hace es con miras a controlar las causas de su ocurrencia. La dificultad para distinguir estos tipos de erosión, han resultado a menudo en reconocer la

gravedad de la erosión causada por el hombre (COLPOS, 1977). Para esta institución la erosión se divide en:

*La erosión hídrica.* Es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales: La energía cinética de la gota de lluvia, la escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros, y otros, 2012).

*La erosión eólica.* Es el proceso por el cual el material superficial de los suelos es removido y transportado por el viento. Algunos investigadores consideran la abrasión producida por el impacto de las partículas removidas por el viento como parte de la erosión eólica. La acumulación del material removido puede ocurrir a distancias variables de la fuente de origen dependiendo principalmente de la erosividad del viento y el tamaño de las partículas removidas (Rostango, Del Valle, & Buschiazzo, 2004).

Por otro lado, Pennok (2019) añade la erosión por labranza, que fue reconocida por los científicos del suelo en la década de 1990, y sigue siendo mucho menos conocida que los otros dos tipos de erosión. En la erosión por labranza, tanto el desprendimiento como el transporte del suelo son por implementos de labranza tales como el arado de vertedera y a diferencia de la erosión hídrica y eólica es difícil de observar visualmente cuando está ocurriendo. La erosión de la labranza causa el adelgazamiento de los suelos en las áreas de laderas superiores y puede resultar en suelos deposicionales sobre espesados en posiciones de pendiente más baja. El suelo depositado en posiciones de pendientes más bajas también puede ser vulnerable a más transporte por erosión hídrica

Por su parte, Cisneros y otros (2012) afirman que la palabra erosión viene del latín “*erosiō*”, y que es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos (como el viento o el agua) o por la fricción continua de otros cuerpos.

Y añaden que la erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas de suelo y que se genera por el siguiente proceso:

a) La energía cinética de la gota de lluvia. La energía de las lluvias se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los terrones y agregados, generando una salpicadura (erosión por salpicadura) que desprende partículas que luego son arrastradas pendientes abajo. Este fenómeno de disipación de la energía de la lluvia está relacionado a la pérdida de infiltración del suelo

b) La escorrentía en movimiento. Este agente erosivo produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Este agente produce los fenómenos erosivos más visibles (por ejemplo, cárcavas), y es el responsable del movimiento de las partículas de suelo removidas. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos), con una velocidad que puede llegar a 4 m/s, y que es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos.

c) La gravedad: La sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está mojado y en ambientes de altas pendientes. Los movimientos en masa, deslizamientos de laderas, erosión lateral de meandros de ríos, avalanchas de nieve son ejemplos de la acción de la gravedad en procesos erosivos.

#### **1.2.2.4 Formas de erosión hídrica**

Como resultado de las fuertes lluvias, las zonas con poca vegetación y/o vegetación poco arraigada son particularmente vulnerables a los flujos de agua de las precipitaciones, por lo que el agotamiento de los suelos es inevitable (Earth Observing System, 2020).

Según el Colpos (1979) y Tayupanta (1993) las principales formas de erosión hídrica son:

*Erosión por salpicamiento.* Consiste en la dispersión de los agregados del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del terreno (Figura 2); la cantidad de suelo erosionado depende de la clase de suelo y de la pendiente del terreno.

Figura 2. Erosión por salpicamiento



Fuente: (Matadamas Ortiz, 2004)

*Erosión laminar.* Es la remoción más o menos uniforme del suelo en capas delgadas provocado por la saturación del suelo y deslizamiento superficial por la pendiente (Figura 3). Este tipo de erosión se da más frecuentemente en suelos arenosos y en menor escala en los arcillosos, se presentan como manchas aisladas con coloraciones diferentes al del tipo de suelo original y con una capa arable reducida.

Figura 3. Erosión laminar



Fuente: (García Bermejo, y otros, 2009)

*Erosión en canales y canalillos.* Este tipo de erosión ocurre en la mayoría de los suelos y con frecuencia es subestimada por los agricultores porque puede ser borrada fácilmente al realizar sus labores agrícolas. Se presenta cuando la escorrentía se concentra en pequeñas irregularidades naturales o inducidas en la superficie del terreno hasta que adquiere volumen y velocidad para deslizarse por la pendiente, formando en su recorrido cortes en forma de canales y canalillos que pueden verse a simple vista (Figura 4).

Figura 4. Erosión en canales y canalillos



Fuente: (Sergieieva, 2021)



*Cárcavas y zanjas.* Las cárcavas son canales profundos de paredes empinadas (Figura 5); se observan con mayor frecuencia en suelos profundos y frágiles, producidas por un desprendimiento del suelo a causa del flujo del agua e inestabilidad de la pendiente. Cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno las cárcavas van ampliándose a lo ancho y en lo profundo año tras año dividiendo campos y obstaculizando el terreno y las actividades sobre este.

Figura 5. Cárcavas y zanjas



Fuente: (Cartón, 2021)

Cuando la cárcava adquiere cierta profundidad toma forma de cascada produciendo turbulencia en la base de esta; la parte superior queda sobresaliendo y por el peso se desprenden bloques de suelo, avanzando así la cárcava hacia la parte superior. Este proceso es conocido como erosión en cárcavas remontantes o caída remontante.

### **1.2.3 Impactos de la erosión hídrica dentro y fuera del sitio**

La pérdida de suelo genera una serie de impactos negativos ya sean ambientales, económicos o sociales y se pueden observar en el sitio donde se produce o fuera del mismo (por sedimentación o azolvamiento).



**a) En el sitio o parcela**

La erosión acelerada del suelo causa efectos tanto en el sitio como fuera del sitio. No solo afecta a las tierras agrícolas sino también los terrenos de bosques y pastizales.

El principal efecto “in situ” de la erosión es la reducción del espesor de la capa superior del suelo, que da como resultado la degradación estructural, la compactación, el agotamiento de nutrientes, la pérdida de materia orgánica, emergencia deficiente de las plántulas, menor filtración de contaminantes, disminución en el almacenamiento de carbono y nutrientes produciendo una disminución de los cultivos. Se puede argumentar que, de acuerdo con la ley de conservación de la materia, las pérdidas de suelo por erosión en un lugar se compensan con las ganancias en otro. El problema es que el suelo erosionado puede depositarse en lugares donde se puede o no cultivar o puede llegar a enterrar e inundar los cultivos en los valles (Blanco & Lal, 2008).

**b) Fuera del sitio o cuenca**

La erosión hídrica y eólica eliminan preferentemente las capas del suelo donde se concentran la mayoría de los productos químicos agrícolas (por ejemplo, nutrientes o pesticidas). Por lo tanto, el transporte fuera del sitio de sedimentos y productos químicos causa contaminación y sedimentación de los recursos hídricos. Las partículas de polvo penetran edificios, casas, jardines, depósitos de agua, depósitos en campos, ríos, lagos y pozos que causan contaminación y aumentan los costos de mantenimiento. Las tormentas de polvo transportan materiales inorgánicos y orgánicos finos, que se distribuyen a lo largo de la trayectoria del viento. La mayoría de las partículas suspendidas se transportan fuera del sitio y se depositan cientos o incluso a miles de kilómetros de la fuente. Las partículas finas en suspensión en el aire con diámetros de 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) representan una amenaza cada vez mayor a la salud humana y animal, la seguridad industrial y las plantas de procesamiento de alimentos. (Blanco & Lal, 2008).

### 1.3 La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) es aclamada como uno de los avances más importantes en la conservación del suelo y el agua en el siglo XX. Es una tecnología empírica que se ha aplicado en todo el mundo para estimar la erosión del suelo por el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial. El desarrollo de la EUPS fue la culminación de décadas de experimentación con la erosión del suelo realizadas por profesores universitarios y científicos federales en todo Estados Unidos.

La EUPS como tecnología completa se publicó por primera vez en 1965 en el Manual de Agricultura No. 282 del USDA. En 1978 se publicó una versión actualizada en el Manual de Agricultura No. 537. La Ecuación de Pérdida de Suelo Universal Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés), que es una versión computarizada de EUPS con mejoras en muchos de las estimaciones de factores, se lanzó inicialmente para uso público en 1992. Se continúa trabajando en una versión mejorada del software para Windows, conocida como RUSLE2 (National Soil Erosion Research: West Lafayette, IN, 2016).

#### a) Desarrollo o antecedentes de la EUPS

Kirkby y Morgan (1984) y el National Soil Erosion Research: West Lafayette, IN (2016), hacen una breve historia de los antecedentes de la Ecuación de Pérdida de Suelo (EUPS), misma que a continuación se presenta:

- El desarrollo de ecuaciones matemáticas para estimar la cantidad de erosión del suelo y el impacto del uso de prácticas alternativas de manejo de cultivos y / o prácticas de conservación comenzó en la década de 1940. El científico americano A.W. Zingg en 1940 publicó los resultados de un estudio exhaustivo sobre los efectos de la pendiente y la longitud de la pendiente sobre la erosión de las parcelas sometidas a precipitaciones naturales y simuladas en Ingeniería Agrícola. La ecuación para representar sus datos fue  $A = C S^{1.4} L^{0.6}$ , donde A era la pérdida promedio de suelo por unidad de área, C era una constante, S era la pendiente de la tierra (%) y L era la longitud de la pendiente (pies).

- Esto fue seguido en 1941 en Ingeniería agrícola por Dwight D. Smith, quien agregó factores de prácticas de cultivo y de apoyo a la función de Zingg. Su ecuación fue  $A = C S^{1.4} L^{0.6} P$ , donde P era la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación mecánica y la pérdida de suelo sin la práctica. El factor C en esta ecuación incluyó los efectos del suelo, el clima y el sistema de cultivo. Smith usó esta ecuación para crear un procedimiento gráfico para seleccionar prácticas de conservación en el Medio Oeste. Smith también introdujo la idea de un límite anual o valor tolerable de pérdida de suelo. Esta ecuación fue utilizada en todo Iowa por G.M. Browning y sus compañeros de trabajo, con factores adicionales para la erosión y manejo del suelo (National Soil Erosion Research: West Lafayette, IN, 2016).
- **b) Enfoques y factores de la EUPS**
- Existen diversos enfoques para determinar la erosión hídrica en cuencas hidrográficas, los cuales generan información que puede ser utilizada con fines de restauración, producción agrícola, desarrollos urbanísticos, actividades recreativas y/o de protección. Estos han evolucionado a medida que ha incrementado la actividad productiva y la degradación de los suelos por acciones antrópicas. En los tiempos contemporáneos, el ser humano en su afán de colonizar tierras expande las fronteras agrícolas, degradando el medio ambiente. Dichos enfoques se han desarrollado con base en los factores antrópicos y naturales que intervienen en la erosión hídrica y analizan en su gran mayoría componentes tales como: suelos, topografía, clima, cobertura y uso de la tierra y prácticas culturales.
- Dentro de los enfoques para la determinación de la erosión hídrica se destacan: USLE por sus siglas en inglés y sus modificaciones MUSLE (USLE modificada) y RUSLE (USLE revisada), ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation), AGNPS (Agricultural Non-point Source), CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), IRE, Fournier y Filiberto López Cadenas del Llano.

La USLE es un modelo diseñado para predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo y cultivos.

La USLE se expresa, en el sistema métrico internacional, como:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

$A$  = Pérdida de suelo (ton/ha/año)

$R$  = Factor erosividad de la lluvia (Mj\*mm/ha\*año)

$K$  = Factor erosionabilidad del suelo (ton/ha)/(Mj\*mm/ha\*h)

$L$  = Factor longitud del terreno (adimensional)

$S$  = Factor pendiente del terreno (adimensional)

$C$  = Factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional)

$P$  = Factor prácticas de conservación (adimensional)

Unidades:

Mega Joules ( $Mj$ )

Milímetros ( $mm$ )

Hectáreas ( $ha$ )

Horas ( $h$ )

El cálculo de la erosión actual se obtiene a través de la EUPS, efectuando la multiplicación de todos los factores que la conforman:  $R * K * L * S * C * P$ . En cuanto a la erosión potencial se puede obtener a través de las dos metodologías; a partir de la EUPS se obtiene multiplicando sólo tres de sus factores  $R * K * L * S$  manejándose  $LS$  como un solo factor (Corporación Autónoma Regional de Tolima, 2007).

## 1.5 Sistemas de Información Geográfica

De acuerdo con Morgan (2005) para estimar la erosión los SIG utilizan una especie de combinación entre varios modelos:

*Digital.* Es el basado en el uso de computadoras digitales para procesar grandes cantidades de datos.

*Físicamente basados.* Basado en ecuaciones matemáticas para describir los procesos involucrados en el modelo, teniendo en cuenta las leyes de conservación de masa y energía

*Estocástico.* Basado en la generación de secuencias sintéticas de datos a partir de las características estadísticas de los datos de muestra existentes.

*Empírico.* Basado en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre variables importantes donde existe una base de datos razonable.

Como ya lo mencionan los modelos de este tipo de evaluación se basa en el uso de modelos matemáticos desarrollados sobre bases estadísticas, empíricas o de leyes físicas. La utilización de gran número de variables importantes, relacionadas con los procesos de degradación y sus interacciones, para determinar probabilidades y riesgos de erosión de suelos y su influencia en la producción de cultivos y daños ambientales, puede facilitarse con su integración en modelos cuando se integran con Sistemas de Información Geográfica (SIGs), la modelación y el monitoreo pueden proveer la base para la planificación del uso y manejo sostenible de las tierras (Vega Carreño & Febles Gonzáles, 2005).

A pesar de que los modelos y las ecuaciones no tienen un acercamiento a la realidad como los métodos empíricos si brindan datos e información muy aproximada a esta. Expresada esta información en cálculos matemáticos, estadísticos y productos cartográficos ayudan a comprender situaciones complejas y ser tomadas en cuenta para la toma de decisiones, prevención de desastres y daños ambientales.

La implementación de métodos para predecir la pérdida de suelo por erosión en México no ha sido muy extensa, se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de cuenca hidrográfica y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas utilizando parcelas de erosión o lotes de escurrimiento, pero pocos estudios se han enfocado a la predicción de la erosión con fines de planeación y diseño de prácticas de conservación de suelos.

Debido a la magnitud de la problemática mencionada se han realizado estudios por organismos gubernamentales e instituciones de investigación, estos se basan principalmente en diagnósticos visuales de diferentes cuencas hidrográficas y en algunos casos mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo con base en la cartografía existente. Existe divergencia en los resultados obtenidos, sin embargo, todas estas investigaciones indican el papel clave que juega la cobertura vegetal en disminuir o acrecentar el proceso erosivo de la lluvia en combinación con una topografía pronunciada.

La ventaja de la EUPS es que el índice de erosividad permite considerar de modo más preciso las diferencias de pluviosidad de una tormenta a otra, o de una estación a otra. Sin embargo, en la práctica es muy difícil tener los datos que permitan estimar el índice de erosividad, esto debido a la escasez y mala distribución de los pluviómetros (Santa Cruz De León, 2011).

La estimación de los factores R, K y LS sirve para hacer un pronóstico sobre el riesgo de erosión o erosión potencial a nivel de cuenca o microcuenca. Este análisis se realiza a través de los SIG y no incluye los factores C y P de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. La zona de riesgo se localiza preferentemente en las zonas altas y de pendiente fuerte. También se observa que el riesgo es importante cuando la erosión va de 40 a 80 ton/ha/año en las zonas de transición (piedemonte) e inclusive en algunas partes bajas de las cuencas (Montes de León, Domínguez Cortazar, & Ventura Ramos, s/f).

Por su parte, Teh (2011) menciona que los SIG son programas muy útiles para modelar la erosión del suelo. El análisis de la erosión de suelos está avanzando debido a las ventajas de combinar los SIG y modelos de erosión del suelo:

En primer lugar, la interconexión de las capacidades de los SIG con la RUSLE (por sus siglas en inglés) proporciona un análisis y visualización del probable potencial de erosión del suelo de laminar y de los arroyos. Este es útil porque permitirá la simulación de estudios a gran escala utilizando grandes cantidades de datos requiriendo solo un tiempo de procesamiento relativamente corto.

En segundo lugar, los SIG también permiten la simulación de diferentes escenarios de varios terrenos cambiantes, condiciones de uso y alternativas de manejo en el espacio y el tiempo además las cuencas también se pueden modelar con más especificidad porque los SIG permiten el uso de grandes cuencas con varias resoluciones o más píxeles.

La integración de RUSLE y los SIG también se puede utilizar como una herramienta de automatización para ayudar en la estandarización de la aplicación del RUSLE a grandes áreas. Cuando el procedimiento es normalizado y los datos de entrada son de calidad comparable, el procesamiento automatizado permite mismo procedimiento que se repetirá con el procedimiento normalizado en diferentes áreas para que se pueden comparar sin sesgos.

En muchos países en desarrollo, la disponibilidad de datos espaciales es usualmente limitada o no existe. Por lo tanto, es necesario crear información espacial tales como modelos digitales de elevación mediante la digitalización de líneas de nivel de mapas topográficos. Este trabajo es tedioso, pero es necesario para la planificación de uso del suelo y trabajos de análisis espacial (Chávez, s/f).

Las variables necesarias para realizar el cálculo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo son:

*Modelo Digital* de Elevación (DEM) por sus siglas en inglés: Se crea interpolando los datos de la altitud de las curvas de nivel generando una capa (layer) de formato ráster en donde cada pixel representara un valor de altitud de cierta superficie dependiendo del tamaño de celda.

*Precipitación:* Se obtiene mediante la interpolación con el método IDW o el método de Kriging de los datos de precipitación promedio anual o mensual dependiendo la disponibilidad de datos y del periodo estudiado generando así isoyetas en formato ráster con datos en milímetros de la precipitación.

*Edafología y cubierta del suelo:* Se necesita digitalizar las cartas físicas y llenar las bases de datos para que cuando sean transformadas a formato ráster se tenga una capa que represente los datos del espacio físico.

Una vez cubriendo las variables necesarias se procede a realizar la multiplicación de los valores usando la calculadora ráster.

#### **1.4 Obras y prácticas de conservación de suelo**

Las prácticas de conservación y restauración de suelos son acciones que contribuyen a disminuir su degradación, principalmente la erosión e incrementar la captación y calidad del agua (Tejeda Sartorius, 2017).

La erosión y la pérdida de fertilidad del suelo son de los problemas más graves de la agricultura de nuestro país. Se presentan, sobre todo, en los terrenos agrícolas que no cuentan con cubierta vegetal o que se localizan en áreas con mucha pendiente (fácilmente erosionables). Para contrarrestarlos se han generado diversas prácticas agrícolas cuyo objetivo es conservar el suelo como recurso productivo (Vivas Enríquez, y otros, 2014). Algunas de ellas son las siguientes:

*Prácticas mecánicas para conservar el suelo:* Las prácticas mecánicas para conservar el suelo son las actividades que consisten en realizar movimientos de tierra con el fin de que la superficie del terreno adquiriera nuevas formas que ayuden a reducir la erosión. Algunos ejemplos son el **surcado al contorno** o las **terrazas** y se recomiendan en terrenos agrícolas con pendiente. Mediante estas prácticas se reduce la velocidad de los escurrimientos superficiales y, por tanto, control de la erosión y más tiempo de infiltración del agua en el suelo. Se pueden realizar con maquinaria o con herramientas de labranza tradicional.



*Prácticas vegetativas para conservar el suelo:* Son aquellas que consisten en establecer poblaciones vegetales sobre el terreno para evitar la erosión hídrica y eólica al disminuir los escurrimientos superficiales y al reducir la acción erosiva del viento. El modo en que la vegetación impide el efecto erosivo del agua es el siguiente: el follaje de las plantas amortigua la fuerza del impacto de las gotas de lluvia, se permite mayor oportunidad de infiltración y al reducirse el escurrimiento superficial se evita el arrastre del suelo. Por los diversos procedimientos en que se manejan las poblaciones vegetales y el entorno en el que se realicen se pueden llevar a cabo las siguientes prácticas:

### *Rotación de cultivo*

Los objetivos de las rotaciones de acuerdo con (Morales Flores & Martínez Menez, s/f) son:

- Incrementar los rendimientos de los cultivos en relación con los monocultivos.
- Mantener y mejorar los contenidos de materia orgánica del suelo.
- Mejorar la fertilidad del suelo y mantener un balance de los nutrimentos disponible para las plantas.
- Reducir la erosión hídrica y eólica.
- Mejorar la adaptación de la labranza de conservación en comparación con los monocultivos.
- Mejorar el drenaje, la aireación del suelo, y el tamaño y la estabilidad de los agregados del suelo.
- Reducir la incidencia de malezas, insectos y enfermedades en los cultivos.

### *Abonos verdes*

De acuerdo con la SAGARPA & COLPOS (s/f) los objetivos de los abonos verdes son:

- Incrementar los rendimientos de los cultivos en relación con los monocultivos.
- Mantener y mejorar los contenidos de materia orgánica del suelo.
- Mejorar la fertilidad del suelo y mantener un balance de los nutrientes disponible para las plantas.
- Reducir la erosión hídrica y eólica.
- Mejorar la adaptación de la labranza de conservación en comparación con los
- monocultivos.
- •Mejorar el drenaje, la aireación del suelo, y el tamaño y la estabilidad de los agregados del suelo.
- Reducir la incidencia de malezas, insectos y enfermedades en los cultivos.

### *Labranza de Conservación*

La SAGARPA & COLPOS (s/f) señalan que las ventajas de la labranza de conservación son:

- Conserva la humedad y reduce la erosión del suelo
- Reduce los costos de producción
- Incrementa la productividad del suelo
- Ahorra energía, tiempo y mano de obra
- Reduce la compactación del suelo
- Mejora el drenaje interno del suelo
- Reduce las deficiencias hídricas
- Genera mayor actividad biológica en la superficie del suelo

Existen otras prácticas de conservación como son: cultivos en fajas, cortinas rompevientos o reforestaciones.

## **1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el suelo**

El suelo toma un papel fundamental para el avance y logro de los ODS de la Agenda 2030.

De acuerdo con la (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2019) el suelo es indispensable para los siguientes objetivos:

**Hambre cero:** Mejorando la calidad del suelo y promoviendo una agricultura sostenible para poner fin al hambre, alcanzar la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición de la población.

**Salud y bienestar:** Se puede garantizar una vida sana evitando la contaminación de los suelos por el uso de productos químicos peligrosos.

**Agua limpia y saneamiento:** Al preservar la calidad del suelo se garantiza la disponibilidad y calidad del agua para beber y para la agricultura.

**Ciudades y comunidades sostenibles:** Preservar los suelos le da a los seres humanos ciudades y comunidades resilientes, seguras y sostenibles ya que salvaguardan el patrimonio cultural y natural.

**Producción y consumo responsables:** Con una producción y un consumo sostenible se evita que residuos no lleguen al suelo lo cual podría llevar a problemas de salud, ambientales y en la producción de más productos o servicios.

**Acción por el clima:** El suelo desempeña un papel positivo en la reducción de los impactos del cambio climático mediante la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

**Vida de los ecosistemas terrestres:** Preservando los suelos se lucha contra la desertificación, la degradación de los ecosistemas forestales y la pérdida de la biodiversidad terrestre.

## **1.7 Conclusiones parciales**

Se concluye con que el suelo posee una gran importancia como recurso natural debido a la gran cantidad de servicios ecosistémicos que brinda al ser humano y al medio ambiente por lo que es fundamental el comprender sus problemáticas como es el caso de la erosión y la degradación de suelos en sus diferentes formas y cómo abordarlas.

De acuerdo con los diferentes autores la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo resulta ser una metodología útil para la estimación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica ya que está basado en diferentes modelos y requiere de diferentes variables que interactúan desde otras perspectivas del medio físico como la fuerza con la que las gotas de lluvia impactan contra el suelo, las propiedades físicas de los diferentes tipos de suelo, la longitud de la pendiente y la cobertura vegetal del suelo.

Una de las finalidades de estimar las pérdidas de suelo es proponer obras y prácticas de conservación de suelo que mejor se adecuen de acuerdo a la situación del lugar esto no solo en base a la cantidad de pérdidas de suelo sino también a sus características biofísicas principalmente al uso del suelo y las actividades que se realicen sobre este.

## CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se realizó una recopilación de casos de estudio a nivel internacional, nacional y estatal acerca de la estimación de la pérdida de suelo utilizando sistemas de información geográfica y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo con diferentes metodologías y modelos según las diversas áreas de estudio y sus características biofísicas.

### 2.1 Casos Internacionales

- a) Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia

Los autores Getnet & Mulu (2021) identificaron áreas críticas de erosión del suelo y ubicaciones de barrancos utilizando la (RUSLE), evaluación de criterios múltiples técnicas de análisis y Sistema de Información Geográfica (SIG), mapa de uso del suelo/cobertura del suelo (LU/LC), mapa de pendientes, mapa de precipitaciones y modelo digital de elevación (DEM) fueron los insumos necesarios utilizados para su estudio en el Nilo Azul en Etiopia. De acuerdo con la (FAO, 1986) cerca de 1.9 billones de toneladas de suelo fértil es removido anualmente de las tierras altas de Etiopia por erosión hídrica, esta cantidad es el equivalente estándar de una pérdida de suelo de 130 ton/ha/año provenientes de tierras agrícolas (Hurni, y otros, 2010).

La Evaluación de Criterios Múltiples (MCDA, por sus siglas en inglés) reveló que el 4.8% de la cuenca es muy sensible a la erosión hídrica, 54.4% moderadamente sensible, 17.69% es marginalmente sensible y el 23.28% no es sensible. Todo esto se obtuvo después de establecer índices jerárquicos de los factores obtenidos de la RUSLE y reclasificar los valores utilizando los SIG.

- b) Soil erosion assessment in the Blue Nile Basin driven by a novel RUSLE-GEE framework

En la misma región que la investigación anterior, Elnashar y otros (2021) propusieron un marco revisado de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

implementado en la plataforma en la nube de Google Earth Engine (RUSLE-GEE) para la erosión del suelo de alta resolución espacial (90 m). Usando RUSLE-GEE se analizó la tasa de pérdida de suelo para diferentes niveles de erosión, tipos de cobertura del suelo y pendientes en la cuenca del Nilo Azul. Los resultados mostraron que la tasa media de pérdida de suelo es 39,73, 57,98 y 6,40 t/ha/año para todas las cuencas del Nilo Azul, Alto Nilo Azul y Bajo Nilo Azul.

Los insumos necesarios para este estudio incluyen precipitación TRMM de teledetección, Conjuntos de datos de SoilGrids del International Soil Reference and Information Center (ISRIC), conjunto de datos del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) del Copernicus land cover layers y Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) y el Modelo de Elevación Digital (DEM). La tasa de pérdida de suelo estimada del RUSLE-GEE se clasifica en 5 clases de la siguiente manera (Gashaw, y otros, 2020):

- Muy leve (<5 ton/ha/año)
- Leve (5-10 ton/ha/año)
- Moderado (10-30 ton/ha/año)
- Grave (30-50 ton/ha/año)
- Muy severo (>50 ton/ha/año)

Por lo que la erosión en las partes medias y altas de la cuenca del Nilo Azul se encuentran en un estado de erosión grave mientras que las partes bajas de la cuenca poseen un estado de erosión leve.

En la actualidad, los modelos basados en USLE son atractivos ya que los datos de entrada son generalmente fáciles de obtener. El USLE fue desarrollado con referencia específica a la escala temporal media anual. Bagarello, Di Stefano, Ferro, & Pampalone (2017) proponen utilizar otros modelos como el USLE-M (versión modificada de la USLE basada en el factor de erosividad de la lluvia para un evento, que es el producto del índice de erosividad de 30 min (Kinnell & Risse, 1998)) y el USLE-MM (modelo de erosión por lluvia que predice la pérdida de suelo utilizando un índice de erosividad que viene dado por el índice QREI30 a una potencia > 1.0. (Kinnell P. I., 2017)) ya que permiten calcular la

pérdida de suelo en una escala temporal más corta y específica porque incluye la escorrentía como variable adicional esto se justifica debido a que hay circunstancias en las que la pérdida de suelo sea causada por un solo evento al año. En el periodo de enero de 2002 a marzo de 2015 mostró un mejor desempeño los modelos USLE-M y USLE-MM que la clásica USLE ya que se pudieron determinar los máximos eventos anuales de pérdida de suelo.

### c) Erosión hídrica en la cuenca alta del Río Moche

En este estudio, Huerta Fernández & Loli Figueroa (2014), estimaron la pérdida de suelo tomando en cuenta las precipitaciones pluviales como factor principal de la erosión hídrica cuantificando la escorrentía superficial y la pérdida de suelo bajo condiciones de uso de suelo en la cuenca alta del Río Moche en La Libertad Perú. Se determinaron los caudales de los ríos y se utilizó el registro de lluvias de un período de 24 años (1988-2011) de la estación meteorológica del SENAMHI. Este dato permitió estimar el poder erosivo de las precipitaciones como factor determinante de la erosión en términos de degradación específica en t/ha/año mediante el método de Fournier, basado en la función fundamental del coeficiente  $p^2/P$ , siendo  $p$  la precipitación del mes más lluvioso y  $P$  la precipitación total anual, para ello establece como parámetros representativos de ambos factores los siguientes:

- El índice de agresividad del clima, definido por la relación  $p^2/P$ . Esta evaluación del factor climático se complementa con la consideración del tipo de clima de la cuenca. Para el relieve se emplea el coeficiente orográfico:  $h.tg\alpha$ , siendo  $h$ , la altura media del relieve de la cuenca en m. y  $tg\alpha$  el coeficiente de masividad de Martone:  $tg\alpha=h/S$ ; donde  $S$  es la proyección horizontal de la superficie de la cuenca en  $km^2$ . Este coeficiente caracteriza eficazmente el relieve de dos cuencas distintas. Siendo mayor de 6 el relieve es accidentado y si es menor de 6, es poco accidentado (Mármol, 2008). El estudio de la correlación lineal establecida entre el valor de  $X$ , degradación específica de la cuenca expresada en t/ha/año o t/ $km^2$ /año y el valor de  $Y$ , índice de agresividad del clima en mm.

Se encontraron pérdidas de suelo de entre 7.29 y 33.40 t/ha/año. Estas pérdidas por erosión son consideradas valores altos, comparados con el rango permisible por la FAO (0.4-1.8 t/ha/año) ya que afectan los agroecosistemas.

**d) Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana**

Por otra parte, Vásquez & Tapia (2011) utilizaron el método de las parcelas con clavos para medir la erosión hídrica en 22 microcuencas de 12 regiones de la Sierra Peruana. El trabajo se llevó a cabo durante los años 2010 y 2011, pero al mismo tiempo se ha recuperado y procesado información de más de 25 años de trabajo ininterrumpido de las autoridades gubernamentales dedicadas al área rural de esta parte de los Andes peruanos.

En cada microcuenca seleccionada se ubicó una zona de una hectárea aproximadamente, donde se instalaron tres parcelas de medición en el área tratada con zanjas de infiltración y otras tres parcelas contiguas en la parte del testigo, es decir sin ningún tratamiento. Cada parcela era de forma rectangular cuyas dimensiones eran 1.20 m de ancho por 4.40 m de largo. En cada parcela se instaló 48 varillas o clavos de erosión de 37.5 cm de largo y 3/8 de pulgada de diámetro cada una, con un espaciamiento entre ellas de 0.40 m. Fueron enterradas en suelo desnudo hasta los 20 cm de largo de cada varilla. En cada parcela, se emplearon 288 varillas de erosión y en todo el trabajo de investigación se utilizó en total 6,336 varillas.

La cuantificación de la erosión o sedimentación se efectuó sumando todas las lecturas obtenidas para cada una de las 48 varillas de cada parcela, es decir las lecturas de erosión (+) eran sumadas algebraicamente con las lecturas de la sedimentación (–), arrojando finalmente el valor promedio de la suma total. En este caso, todos los valores hallados fueron (+), lo cual indicaba que había ocurrido una pérdida de suelo en la parcela. Este valor final (h) expresado en mm de suelo, para ser transformado a “t/ha” con la siguiente ecuación:

$$Ps = h * Dap * 10$$



Donde:

$P_s$  = Pérdida de suelo por erosión o sedimentación (ton/ha)

$h$  = Lámina de suelo erosionado o sedimentado (mm)

$D_{ap}$  = Densidad aparente del suelo ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

Los resultados promedio obtenidos de las 22 microcuencas son que la erosión hídrica varía entre 24.44 t/ha/año y 45.04 t/ha/año, aunque la erosión haya sido tratada con zanjas de infiltración en ciertas zonas del estudio.

e) Modelo predictivo para cuantificar la erosión hídrica con base en experimentación en Sabrinski Municipio de Mosquera

En la región de Sabrinski al suroeste de Bogotá, García Olmos, Riaño Melo, & Achury Arias (2003) establecieron 24 parcelas de escorrentía con una dimensión de 100 metros cuadrados en pendientes del 15% a 50%, bajo tres tipos de coberturas: una forestal de pinos y eucalipto, una de vegetación propia de la zona, denominada rastrojo y una de suelo desnudo como referencia. Se realizaron durante un año mediciones de las pérdidas de suelo. Se recopiló la información correspondiente y se comparó frente a la obtenida mediante el cálculo con los modelos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), Modelo Predictivo de Pérdida de Suelo para el Sudeste de África llamado Slemsa y el Modelo de Morgan, Morgan y Finney.

Las parcelas fueron acomodadas de la siguiente manera para la experimentación (Tabla 1).

Tabla 1. Parcelas para la experimentación.

No. de Parcelas	Tipo de cobertura	Pendiente (%)
1-4	Forestal 1	40-50
5-8	Forestal 1	15-25
9-12	Rastrojos 2	40-50
13-16	Rastrojos 2	15-25
17-20	Suelo Desnudo	40-50
21-24	Suelo Desnudo	15-25

Fuente: (García Olmos, Riaño Melo, & Achury Arias, 2003)

En cada una de las parcelas se delimitó el área con láminas de zinc, y con canal de desviación en la parte superior, y se establecieron estructuras de medición consistentes en una canal revestido en concreto en la parte inferior, de la parcela, donde se retuvieron los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía del agua lluvia. Los sedimentos en suspensión y el volumen de agua de escorrentía se almacenaron en un tanque de 15 galones colocado en la parte media del canal, donde confluyeron sus pendientes laterales. Las pérdidas de suelo por salpicadura se midieron con recipientes de 7 centímetros de diámetro y 5 de profundidad puestos aleatoriamente en las parcelas.

Cuando se reunieron los datos suficientes procedieron a hacer los cálculos con tres métodos diferentes, el primero fue utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos:

$$AS = R * K * L * S * C * P$$

El modelo Predictivo de Pérdidas de Suelo para el Sudeste de África, llamado SLEMSA, fue desarrollado en Zimbawe para determinar las medidas adecuadas de conservación de suelos. La ecuación es:

$$Z = K * X * C$$

Donde:

Z = Pérdida media anual de suelo (ton/ha/ año)

K= Pérdida media anual de suelo para la parcela tipo (ton/ha/año)

X= Factor de longitud de pendiente

C= Manejo de cobertura vegetal

En el modelo de Morgan y Finney el factor  $K$  se calcula para una parcela tipo de 20 m de longitud por 5 m de anchura de un suelo de erosionabilidad conocida ( $F$ ) de acuerdo con la textura del suelo, presentado por Morgan (1997) y la siguiente ecuación:

$$\ln K = b * \ln E_c + a$$

$$a = 2.884 - 8.2109 * F$$

$$b = 0.4681 + 0.7663 * F$$

$$E = \text{Energía cinética de la lluvia, según Wischmmeier } E \\ = E_c(Jm - 2mm)$$

Las pérdidas de suelo calculadas con la EUPS fueron de 80.88 ton/ha/año frente a 40.58 ton/ha/ año observadas para un período de un año.

Según el modelo SLEMSA las pérdidas de suelo totales fueron de 631.77 ton/ha/año.

Con el modelo de Morgan, Morgan y Finney, se obtuvieron pérdidas de suelo de 14443.36 ton/ha/ año, que sobrevaloran considerablemente las pérdidas de suelo observables.

De acuerdo con los resultados y la labor desarrollada para obtenerlos, se llegó a determinar un modelo más representativo del proceso erosivo en Sabrinski con el modelo SLEMSA, ya que permitió mediante un ajuste del factor  $f(S)$ , que es la pendiente, encontrar unos valores de las pérdidas de suelo con un 66.6% de aproximación a las pérdidas de suelo observables.

## 2.2 Casos Nacionales

En este apartado se presentan varios estudios a nivel México realizados por diferentes autores.

### a) Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Lago de Chapala, Michoacán, México

En el caso de la erosión hídrica en la cuenca del Lago de Chapala en Michoacán, Silva García y otros (2017) cuantificaron para la cuenca del Lago de Chapala (en la porción de Michoacán), la pérdida de suelo por erosión hídrica, utilizando como método de medición las parcelas de escurrimiento que fueron delimitadas y aisladas con láminas galvanizadas de 3 x 0.4 m, fijadas al suelo, sobresaliendo aproximadamente 30 cm de la superficie; las parcelas están compuestas, además de su zona de escurrimiento, por un sistema colector del sedimento a base de un tambo de 100 L, al cual se le ha retirado el fondo colocando en él una malla plástica mosquitera que se fija al tambo con un cinturón 8 metálico, cuyo propósito es retener los sedimentos presentes en el agua escurrida. La ubicación de este es la parte baja de la parcela de escurrimiento donde se concentra la esorrentía en favor de la pendiente (COLPOS, 1979).

Un total de 18 parcelas se instalaron por los principales usos de suelo presentes en la región: pastizal, agricultura de riego y de temporal, bosque de encino y matorral subtropical. Se realizó un muestreo mensual durante el periodo de lluvias que abarco los meses de agosto y octubre del 2012. La mayor pérdida de suelo se presentó donde se desarrolla la agricultura de temporal con 630.7 kg/ha, seguido de los pastizales con 87.9 kg/ha y en menor cantidad el bosque de encino con 3.9 kg/ha. Considerando todos los usos de suelo, en total la pérdida de suelo en la zona de estudio fue de 6, 593 t/ha/año, siendo mayor en las áreas de cultivo de temporal con 4, 019 t/ha/año. La materia orgánica fue uno de los componentes del suelo que más se perdieron durante el proceso de erosión hídrica, obteniendo valores de 24.5 y 5.1 kg/ha para cultivos de temporal y pastizales, respectivamente.

**b) Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo**

La investigación de Bolaños Gonzáles y otros (2016) presentaron el mapa nacional de erosión escala 1:50 000, en el cual considera cinco grados y tres formas de erosión hídrica por lo que fue necesario conjuntar diversas fuentes de información para que mediante técnicas de fotointerpretación de imágenes de satélite de alta resolución, cartografía especializada e información de campo se concretara este producto.

Para realizar los procesos de fotointerpretación se realizaron fusiones de las bandas pancromáticas y multiespectrales, que resultaron en imágenes compuestas en falso color con tamaño de píxel de 2.5 m, adicionalmente se empleó información cuantitativa sobre perfiles de suelo y fotografías panorámicas georreferidas generadas en el INFyS para validar las coberturas de erosión extrema, fuerte y suelo estable a la erosión, incluyendo 23 000 perfiles de suelo levantados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de 1968 a 2008. Mediante aplicaciones del software ArcInfoMR (dissolve, unión, eliminate, etc.) fueron integradas las coberturas relacionadas con erosión antes mencionadas en una cobertura única en formato coverage y posteriormente exportada a cobertura shape para visualización en Arc ViewMR, Arc ExplorerMR, Quantum GISMR arrojando así el mapa de erosión actual.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 76% de la superficie de México tienen algún grado de erosión hídrica, siendo el predominante el grado leve (37.06%) y moderado (26.37%).

**c) La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México**

Los autores, Alvarado Cardona, Colmenero Robles, & Valderrábano Almegua (2007) utilizaron una metodología realizada en dos etapas, una descriptiva de los elementos ambientales y otra evaluativa del proceso de erosión en donde se aplicó el método de la FAO y los modelos empíricos del Índice de Erosión de Suelos y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

Para la etapa descriptiva se utilizó la información cartográfica, de los recorridos de campo y de la consulta de distintas fuentes bibliográficas, para obtener la descripción de las características de los elementos del:

- 1) Medio natural: clima, geomorfología, geología, hidrología, edafología y vegetación.
- 2) Medio social: población, vivienda, salud, educación, cultura y religión.
- 3) Medio económico: actividades productivas del sector primario (agricultura, ganadería y silvicultura), secundario (industria), terciario (turismo), PIB, PEA y salarios.

Para la etapa de evaluación se calculó la erosión hídrica utilizando el método de la (FAO, 1980) basado en un análisis de imágenes de satélite, fotografías aéreas y recorridos de campo, aplicando la técnica de fotointerpretación que consiste en un análisis visual e interpretación de los patrones fotográficos utilizando un estereoscopio de espejos y lentes.

Para esto se emplearon fotografías aéreas monocromáticas escala 1: 40 000 y 1:70 000, obtenidas por INEGI en 1987 y 1995 respectivamente, de manera similar se llevó a cabo la interpretación visual y una clasificación supervisada utilizando el software Arcinfo y las imágenes de satélite Landsat 5, (Compañía Eosat), sensor Tematic Mapper (TM), de 1999, escala 1:100,000, con una resolución espectral bandas 2, 3, 4 en falso color y espacial de 25 x 25 m.

Se ubicaron 100 sitios de muestreo y 45 de observación. En relación con los primeros se seleccionaron los 50 más representativos, en cada sitio seleccionado se midió el espesor de los horizontes A, B y C, los cuales fueron comparados con otros perfiles semejantes no erosionados. Por último, se determinaron los porcentajes de la pérdida de los horizontes superficiales y se determinó la clase de erosión actual para cada punto. Esta nueva información permitió reinterpretar las fotografías aéreas monocromáticas e imágenes de satélite, así como elaborar una carta de erosión actual de suelo escala 1:150 000, destacando las formas y clases de erosión.

Los resultados muestran que existen valores de erosión que varían de 1 ton/ha/año hasta 650 ton/ha/año, predominando estos últimos, lo que indica que el área de estudio presenta una erosión muy severa que requiere de aplicación de medidas urgentes de prevención y restauración de los suelos degradados.

#### **d) Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica**

Por su parte, Pando Moreno, Gutiérrez Gutiérrez, Maldonado Hernández, Palacio Prieto, & Estrada Castellón (2003), reportan que en México la erosión hídrica es la que más agobia a las tierras, debido a que el 65% del territorio nacional tiene pendientes mayores a 10%. El estudio se llevó a cabo en la subcuenca del Río Potosí, localizada en el estado de San Luis Potosí se utilizaron dos métodos uno directo y otro indirecto. Con respecto al primero se utilizó el método de los clavos con rondanas (COLPOS, 1977), que consiste en utilizar clavos de 30 centímetros de largo con rondanas holgadas que se colocan cuidadosamente a lo largo de un transecto a intervalos regulares, de manera que la rondana descansa sobre la superficie del suelo y la cabeza del clavo la toque ligeramente.

Se colocaron 44 varillas o clavos distribuidos de manera sistemática a través de todas las unidades geomorfológicas, excepto en aquellas áreas ocupadas por la actividad agrícola y en unidades geomorfológicas con superficies inferiores a 150 ha. Para las unidades muestreadas se determinó la densidad aparente del suelo, a fin de cuantificar las pérdidas en toneladas por unidad de superficie, durante dos temporadas de lluvia ocurridas en 1999. La pérdida de suelo promedio para la superficie evaluada fue de 38.6 t/ha, en el periodo de un año. Esta cifra contrasta fuertemente con los valores reportados para regiones montañosas con cobertura vegetal "normal", que van de 1 a 5 t/ha/año (Pimentel & Kounang, 1998) por lo que se deduce que la microcuenca de captación de la presa "La Estrella" se encuentra bajo un proceso acelerado de erosión.

Con respecto al método indirecto partió de la delimitación de unidades homogéneas en cuanto a tipo de suelo, pendiente, uso de suelo y vegetación, ya que éstas son las variables requeridas para aplicar las ecuaciones de estimación de pérdida de suelo que se utilizaron. La información correspondiente a cada variable (tipo de suelo, pendiente y vegetación) fue digitalizada empleando el

programa Arc/Info y se generaron los mapas mediante el programa Arc-GIS. Estos mapas fueron cruzados a fin de obtener "unidades ambientales" homogéneas, en las cuales se estimó la erosión hídrica mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés):

$$A = R * K * L * S * C * P$$

El total de la erosión estimada con este método fue de 30.19 t/ha/año teniendo una diferencia de 8.41 ton/ha/año menos que el método directo.

e) Estimación de la erosión hídrica actual y potencial de la Sub-cuenca de Sayula, Jalisco, México

Para estimar la erosión hídrica de la subcuenca de Sayula en Jalisco, México el autor Vargas Lomelín (2015) utilizó la RUSLE para llevar a cabo el estudio y posteriormente graficar la cantidad de erosión actual y potencial en las diferentes geoformas del sitio.

El proceso metodológico se dividió en tres fases principales: recolección de datos, integración de datos a un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el análisis y discusión de los resultados.

Recolección de datos:

Para la obtención del factor R, se recolectó del Sistema Meteorológico Nacional un compendio de las medias estadísticas mensuales y anuales de precipitación durante el periodo de los años 1961 – 2000 de 22 estaciones meteorológicas distribuidas tanto dentro como en el área circundante de la subcuenca. Después, se procedió a calcular el factor R con la información de cada estación con la fórmula de Arnolds modificada por Fornoulds:

$$R = 0.032(RI)^{1.9}$$

$$RI = \sum MR^2 / AR$$



Donde:

$MR$  = Media mensual de precipitación pluvial.

$AR$  = Media anual de precipitación pluvial.

Para la estimación del factor  $K$ , se clasificó la cuenca en 37 unidades fisiográficas, caracterizados primeramente con información bibliográfica contenida en SIG, incluyendo los tipos climáticos, la vegetación y uso del suelo, la litología superficial, los tipos de suelos y las geoformas, dominantes o con mayor extensión en cada unidad del paisaje posteriormente esto fue corroborado y corregido mediante recorridos y observaciones de campo.

Para la delimitación de las unidades fisiográficas se utilizó un SIG y, como base de interpretación visual y al compuesto en falso color de la imagen satelital según la metodología propuesta por Ortiz Solorio & Cuanalo de la Cerda (1984). La escala trabajada fue de 1:250,000 y el área mínima cartografiada de  $1\text{cm}^2$  en el mapa, correspondiente a 625 ha en terreno.

Para determinar la erodabilidad del suelo, se realizaron dos muestreos y sus respectivas observaciones por cada unidad fisiográfica. El muestreo tuvo un diseño estratificado aleatorio, considerando dos sitios de muestreo y observación para cada unidad.

Después de excavar el pozo pedológico en cada sitio de muestreo, se tomaron fotografías del perfil, luego, se describió y colectó información.

Posteriormente, se aplicaron las variables de cada sitio muestreado en la fórmula de Wischmeier, para calcular el factor  $K$ . El cálculo del factor  $LS$  y  $C$  se aplicó directamente en un SIG.

Integración de datos a un SIG:

La información calculada del factor  $R$  de las estaciones meteorológicas se integró como una capa de datos vectoriales en el SIG. Para obtener información puntual del factor  $R$  a través de la Sub-cuenca, se interpolaron las estimaciones

hechas en cada estación meteorológica utilizando la ecuación geoestadística de Krigging, generando datos tipo RASTER.

La información obtenida a través de la aplicación de la fórmula de Wischmeier por cada uno de los sitios de muestreo de perfiles se integró como una capa vectorial en SIG. Para obtener información puntual del factor K a través de la superficie de la cuenca, se interpolaron los cálculos hechos en cada sitio de muestreo de suelo utilizando la ecuación geoestadística de Krigging, generando datos tipo RASTER.

Para calcular el valor del factor LS, se trazaron vectores en las principales pendientes de cada unidad fisiográfica utilizando el modelo de elevación digital de la Sub-cuenca a través del SIG para obtener la información de las variables de la fórmula antes descrita. Después, se generaron datos tipo RASTER del valor del factor LS por cada unidad.

Para estimar el factor C, se utilizaron los valores de tipo de vegetación propuestos por R. P. Morgan en 1997 aplicándola a la serie IV del INEGI de uso de suelo y vegetación, calculando los porcentajes reales de cobertura de suelo mediante la densidad aparente de la vegetación a través de la imagen satelital SPOT 2005. Posteriormente, se generarán datos tipo RASTER con información puntual del factor C a través de la superficie de la cuenca.

Se omitió el factor P en virtud a que dentro de la cuenca no existen obras ni prácticas de conservación de suelos, por lo que su valor equivale a uno.

Habiendo obtenido la información tipo RASTER para cada factor de la RUSLE, se multiplicarán los valores mediante la función Map Algebra en SIG, aplicando la fórmula de la erosión actual y la erosión potencial respectivamente.

Resultados:

El valor máximo de erosión actual constituyó 41.21 ton/ha/año y el mínimo fue de 0. El análisis realizado demostró que dentro de la Sub-cuenca de Sayula existe mayor pérdida de suelo en la porción sur de la cuenca. A pesar de las

fuertes pendientes de las serranías, no todas presentaron altos índices de erosión debido de a la densidad de la cobertura vegetal.

La erosión potencial, considerada en función de un suelo desnudo sin prácticas de conservación, siguió un patrón similar a los resultados del factor R con algunas ligeras variaciones debido a la influencia del relieve y del tipo de suelo. Los sitios que presentaron una mayor erosión potencial se explican principalmente debido a la erosividad de la lluvia y a que representan las unidades fisiográficas con pendientes de mayor magnitud; siendo el caso contrario de los sitios con menor pérdida de suelo, causado por un relieve plano y con precipitaciones menos erosivas.

### **2.3 Casos Estatales**

Los casos corresponden a diversas investigaciones en el Estado de México.

#### **a) Estimación del balance de sedimentos a través de un SIG empleando los métodos de RUSLE Y SEDIMENTATION**

Para este estudio, Reyes Avilés (2014) realizó un balance de sedimentos a nivel de cuenca, empleando los módulos de RUSLE y SEDIMENTATION implementados en el software de SIG Idrisi. Para ello se estableció un punto de salida (exutorio) y la estimación de un coeficiente de sedimentación.

En este trabajo se analizó la cuenca hidrológica del río Tejalpa, donde la mayor extensión del área, se localiza los municipios de Zinacantepec y Toluca, perteneciente al Estado de México, la cobertura vegetal presente en la cuenca se encuentra amenazada por el aumento de la población y el cambio de uso del suelo. La metodología empleada toma en cuenta los factores de lluvia, suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de conservación de los suelos que se representan en la siguiente expresión:  $(E = R \times K \times LS \times C \times P)$ , componentes del módulo RUSLE, además, para conocer el transporte y procesos de sedimentación del suelo se utilizando el módulo SEDIMENTATION. Con la finalidad de obtener el grado de erosión hídrica en la cuenca y con ello, realizar la cartografía correspondiente para detectar las áreas potencialmente erosivas y

estimar el balance de sedimentos, de esta manera tomar decisiones en la planeación de la conservación del suelo.

Para comenzar con el modelo RUSLE la autora comenzó obteniendo el factor de erodabilidad “K” utilizando el Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II, en formato digital del 2013 de INEGI.

Para el factor “R” en un principio se ubicaron las estaciones climatológicas que se encuentran tanto dentro como en los alrededores de la zona de estudio, con la finalidad de poder adquirir los datos de precipitación pluvial registrados de por lo menos hace 10 años y así, poder generar una imagen de distribución espacial de la precipitación pluvial de la zona.

Para este estudio se seleccionaron 38 estaciones climatológicas, dentro y fuera de la cuenca, pero por falta de información de algunas de ellas, sólo se tomaron en cuenta 20. Posteriormente se extrajeron los datos de la precipitación para hacer una interpolación y obtener la imagen de las isoyetas de la precipitación total para después aplicar las ecuaciones de Renard y Freimund para obtener el valor de R:

$$R = 0.0483 * Pa^{1.610} \quad Pa < 850$$

$$R = 587.8 + 1.249 * Pa + 0.004105 * Pa^2 \quad Pa > 850$$

Donde:

R= Factor de erosividad (MJ mm/ha hr año)

Pa= Precipitación total anual (mm)

El proceso para determinar el factor de cobertura del suelo C, se realizó por medio de una clasificación de imágenes de satélite multiespectrales para generar una imagen compuesta de uso de suelo. Se tomó en cuenta, la imagen compuesta en falso color con las bandas 234, empleando una imagen SPOT 5, con fecha de 7 de Julio 2010, debido a que, es la época del año donde todos los tipos de cobertura están bien definidos en la región, en esta imagen se digitalizaron cinco coberturas de suelo representativas de la zona de estudio.

Se aplicó el método de clasificación supervisada en la clasificación de uso de suelo. Antes de aplicar el método se requirió realizar una visita de campo de la zona de estudio con el propósito de hacer un reconocimiento de éste, distinguir los usos del suelo y localizar áreas representativas de cada tipo de cobertura (sitios de entrenamiento) que puedan ser identificados en la imagen para poder realizar la clasificación.

Una vez clasificada la imagen con las categorías de cuerpo de agua, bosque, área urbana, agrícola y roca se digitalizaron polígonos sobre la imagen para obtener un archivo en formato vectorial de esta y poder ligar una tabla de atributos (Tabla 2) para asignarle el valor del factor C.

Tabla 2. Valores de C.

Cobertura	Valor de C
Bosque (Semidenso)	0.007
Cuerpo de Agua	0
Área urbana	0.001
Área agrícola (maíz)	0.24
Roca	0

Fuente: (Reyes Avilés, 2014)

La imagen del factor de prácticas de conservación del suelo  $P$ , se creó con una resolución de tamaño de píxel de 100 m, por medio de la generación de una imagen booleana de un cuadro del tamaño de los demás factores con un valor de 1, debido a que, se considera que no existen prácticas de conservación del suelo en la zona de estudio.

Los parámetros de pendiente y exposición se determinaron empleando el MED y los módulos de exposición (aspect) y pendiente (slope), además de la imagen del límite de la cuenca río Tejalpa. La longitud de pendiente (factor de longitud de pendiente), se obtuvo multiplicando la resolución del tamaño de píxel de las imágenes generadas por un factor de 1.5 (es el valor que mejor se adapta al módulo de RUSLE). Como se ha mencionado, la resolución del tamaño de píxel empleado en las diferentes imágenes procesadas fue de 100 m.

El objetivo de emplear el módulo de SEDIMENTATION, es poder simular los procesos de sedimentación y la producción de sedimentos (sedimentos que salen de la cuenca transportados por la escorrentía) de una cuenca. Uno de los principales requerimientos para correr el módulo de SEDIMENTATION, es que primero, se requiere correr el módulo de RUSLE, debido a que, éste utiliza algunos resultados (imágenes) generados por el RUSLE.

Las imágenes requeridas por el módulo de SEDIMENTATION a nivel de cuenca son tres, las cuales dos son generadas al ejecutarse el módulo RUSLE y son las siguientes: la imagen de identificación de las divisiones realizadas de la cuenca, la imagen de la pérdida total de suelo de cada división de la cuenca y la imagen del modelo de elevación digital.

Un parámetro numérico importante requerido por el módulo de SEDIMENTATION, es el factor de entrega de sedimentos (SDR), (Sedimentation Delivery Ratio), que representa la relación del sedimento que efectivamente alcanza el punto de salida de la cuenca y la cantidad de sedimento producido por la erosión superficial. La estimación del factor de entrega de sedimentos se calcula en base a la recomendación que se da y que textualmente dice: para el caso de los países en vías de desarrollo es más recomendable emplear la ecuación de Vanoni, para calcular el valor de SDR, debido a que, ésta se derivó de datos de más 300 cuencas distribuidas en diferentes partes del mundo.

#### Resultados:

Los resultados de la erosión hídrica del suelo estimada en esta parte son realizados a nivel cuenca, donde se estima que un total de 23,951.88 ton/ha de suelo son los que potencialmente se erosionan a nivel de cuenca. Mientras que, en promedio están potencialmente disponibles 0.11 ton/ha/año de suelo a erosionarse en toda la cuenca. Lo cual significa que las tolerancias de pérdida de suelo establecida por la FAO es que la pérdida de suelo es moderada.

Por otro lado, la pérdida de suelo por división potencialmente disponible a erosionarse oscila de 65.11 a 1,041 ton/ha año. En tanto que, los resultados de

estimación de la pérdida total promedio de suelo de cada área muestran valores en un rango comprendido entre 0.27 y 4,26 ton/año.

El cálculo de valor de SDR, se realiza empleando la ecuación de Vanoni. Para utilizar esta fórmula, es necesario primero estimar el área de la cuenca en kilómetros cuadrados. Este caso en particular la cuenca presenta una extensión de 253.83 km<sup>2</sup>. El valor resultante del SDR es: 0.2354, el valor de SDR debe ser un valor entre 0.0 y 1.0.

La producción de sedimentos más alta de la erosión hídrica del suelo estimado a nivel de división de cuenca, según el módulo de SEDIMENTATION es de 767 ton/ha. En tanto que, se estima que la pérdida de suelo anual neta por unidad de área más alta es de 3.25 ton/ha año. Los resultados más altos obtenidos, según se observan en las imágenes, tienden a ser en pequeñas áreas, sin embargo, los valores más bajos son los que prevalecen.

#### c) Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México

El estudio a cargo de Castro Mendoza (2013) estimó la erosión hídrica en la microcuenca de Presa Madín en el Estado de México abarcando los municipios de Naucalpan de Juárez, Atizapán de Zaragoza y Jilotzingo. La presa Madín es una de las abastecedoras de agua potable más importantes para la Ciudad de México y la zona metropolitana del Valle de México, uno de los factores que afectan el funcionamiento hidrológico de la microcuenca es la pérdida de suelo por erosión hídrica, lo cual disminuye la calidad y cantidad del recurso agua captado por la microcuenca y almacenado en la presa Madín. El cambio de uso de suelo y el deterioro de la cubierta vegetal es la principal causa de erosión hídrica en la microcuenca.

Lo primero que se hizo fue recolectar los insumos necesarios para llevar a cabo el estudio:

Se definió un polígono con coordenada extrema superior izquierda X452790, Y2162584 UTM 14N WGS84 para extraer del Continuo Digital de Elevación, generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los

valores de altitud del área de estudio. El ráster o modelo digital de elevación (MDE) extraído tiene un total de 2,159 columnas y 1,514 filas para una resolución de 10 m por píxel. Se consultaron los shapes vectoriales temáticos de edafología e hidrología superficial escala 1:250 000 de INEGI.

En cuanto a la determinación del clima se extrajo información de 11 estaciones meteorológicas del extractor de información climatológica ERIC III. Para el caso de la precipitación se elabora un ráster de isoyetas medias anuales. Para determinar el cambio en la cobertura vegetal y uso de suelo, se empleó una imagen satelital LandSat 7 ETM+ de febrero que corresponde a la temporada de secas para el año 2008, escena 26/47.

Para calcular la erosión hídrica potencial y la actual se efectúa el álgebra de mapas con el módulo *Raster Calculator* de la paquetería ArcGis 10 introduciendo las capas ráster de todos los factores conforme a la EUPS.

Con base en la EUPS, se calcula la erosión hídrica potencial de la microcuenca de la presa Madín, considerando los factores *R*, *K*, *L* y *S*. Con los valores obtenidos se realiza la clasificación mostrada (FAO 1979). La tasa de erosión potencial media anual presente en la microcuenca es de 166,6 ton/ha/año, lo cual se presenta en el límite del rango de erosión fuerte.

A diferencia de la erosión potencial, la actual evalúa el efecto de la cobertura vegetal y de las prácticas mecánicas, en caso de existir (factores *C* y *P*). La clasificación de rangos es la propuesta por la FAO. Como se puede ver, el efecto del factor es considerable, ya que prácticamente desaparece la erosión en su condición de severa, y su tasa promedio anual es de 7.58 ton/ha/año ubicado en erosión hídrica incipiente.

En conclusión, la erosión actual de la microcuenca se considera incipiente y es de 7.58 ton/ha/año pudiendo incrementarse hasta 166.6 ton/ha/año, si se perdiera completamente la cobertura vegetal en la microcuenca.



**d) Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México**

En la investigación de (Rivera Toral, Pérez Nieto, Ibañez Castillo, & Hernández Saucedo (2012) utilizaron el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México para estimar la pérdida de suelo, comparando los resultados con los valores estimados mediante la técnica del álgebra de mapas.

El SWAT es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Dr. Jef 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 las prácticas agronómicas tienen en la calidad del agua por el uso de pesticidas y fertilizantes. El modelo SWAT se aplicó en cuencas costeras del estado de Chiapas, México, por la CONAGUA en 2006 para estimar la erosión. Los valores fueron bajos, lo cual se atribuyó que no estaba creado para cuencas con características físicas como las de México; además, habría una subestimación del factor topográfico ( $LS$ ), por ser cuencas con un alto grado de pendiente.

El factor topográfico  $LS$  se describe como la relación esperada de la pérdida de suelo por unidad de área de un campo con pendiente, con respecto a un terreno de 22.1 m de longitud, con 9 % de inclinación, y se calcula con la expresión (1), donde  $L_h$  es la longitud de la pendiente (m),  $m$  es un término exponencial (adimensional) y  $\alpha_h$ , es el ángulo de la pendiente (grados). A su vez, el término exponencial  $m$  se calcula con la expresión (2), donde  $Sh$  es la pendiente de la Subcuenca o Unidad de Respuesta Hidrológica (URH) expresada como elevación sobre distancia (en  $m\ m^{-1}$ ) obtenida de la tercera ecuación.

$$LS = (L_h/22.1)^m (65.41 * \sin^2 [\alpha_h] + 4.56x \sin [\alpha_h] + 0.065)$$

$$m = 0.06[1 - \exp(-35.835 * Sh)]$$

$$S_h = \tan [\alpha_h]$$

La cuenca se localiza al oeste del Estado de México, entre 19° 14' 26.8" y 19° 24' 15.8"N, y entre 100° 10' 51.4" y 100° 19' 20.9" O, con una superficie de 148.064 km<sup>2</sup>. El clima predominante en la región de acuerdo con García (1987) es el templado húmedo con lluvias en verano (Cw). La precipitación media anual en la cuenca, estimada mediante polígonos de Thiessen, es 906.5 mm y la temperatura media anual es 16.9 °C.

La siguiente información fue registrada: Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se obtuvo del sitio electrónico de INEGI para delimitar la cuenca; carta topográfica E14A36 del INEGI (1994) se usó para identificar las carreteras y poblados principales); unidades de suelo y propiedades físico-químicas, lo cual se obtuvo de muestreos en campo; los usos del suelo se obtuvieron mediante imágenes de satélite SPOT 5; los datos climáticos que el modelo requirió fueron precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas, obtenidas del IMTA (2006). Con la información descrita se alimentó el modelo y se realizó la primera corrida. Y con la información recabada se elaboró un SIG para estimar la tasa de erosión de la cuenca con la técnica del álgebra de mapas usando la extensión Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio (SEDEOT) para ArcView 3.x, para evaluar la EUPS, y se compararon con los valores de pérdida de suelo estimados con el modelo SWAT. Al estimar la erosión con SWAT, este modelo calculó el índice de erosividad de la lluvia por medio del  $EI_{30}$  (Wischmeier 1959), y lo definió como el producto de la energía cinética total de la lluvia ( $E$ ) por la intensidad máxima en 30 min ( $I_{30}$ ). En el álgebra de mapas por falta de datos de intensidad de lluvia, la erosividad se estimó mediante la expresión propuesta por (Cortés Torres, 1991), donde  $R$  es el índice de erosividad de la lluvia (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) y  $P$  es la precipitación media anual (mm):

$$R = 3.4880P - 0.000188P^2$$

En la segunda corrida del modelo se tomaron los valores de  $LS$  estimados del álgebra de mapas y tomando los datos de pendiente estimados con SWAT, se despejó la longitud de pendiente de la ecuación y se introdujeron al SWAT. De

esta forma se obtuvieron nuevos valores de erosión y se compararon con la EUPS del álgebra de mapas.

Del cálculo de la erosión con la técnica del álgebra de mapas tomando valores por píxel se encontró que 87.7 % de la cuenca se encuentra en clase de erosión incipiente y ligera. De la simulación del SWAT se obtuvieron 35 subcuencas. En la primera corrida del modelo se realizó la prueba estadística de comparación de medias del factor  $LS$  del SWAT y del álgebra de mapas, y se encontró que las medias de los  $LS$  eran diferentes ( $p \leq 0.1$ ).

Se encontró que SWAT presenta dificultades para estimar la longitud de la pendiente ( $L_h$ ) sobre todo cuando las pendientes son mayores del 25 %, ya que les asigna por defecto un valor de 0.05 m, lo que causa una subestimación de  $LS$ . La corrección de  $L_h$  consistió en modificar los dichos valores en la tabla de atributos del archivo "subbasins.shp", en el campo "Sll", y se corrió nuevamente el modelo. Con los valores obtenidos de EUPS del SWAT y los del álgebra de mapas se aplicó la prueba estadística de comparación de medias y se concluyó que las medias son similares ( $p > 0.1$ ).

En 22 de las subcuencas (114.3 km<sup>2</sup>) la pendiente fue mayor a 25 %, lo que indica que en 77.2 % de la cuenca se subestimaba gravemente la erosión. Con la corrección del  $LS$  se obtuvieron 10 subcuencas (3878.0 ha) que representan 26.2 % con problemas de erosión moderada y severa, en tanto que con el álgebra de mapas y asignando un valor promedio de erosión, un 27.7 % tiene problemas de erosión moderada y severa, lo cual es muy similar.

## 2.4 Conclusiones parciales

De acuerdo con todos los trabajos consultados se concluye que la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo a pesar de ser un método indirecto resulta ser efectivo para estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica en sus formas laminar y canalillos.

Valdivia y otros (2022) señalan que la EUPS es utilizada debido a las siguientes razones:

- 1) Es de aplicación relativamente fácil
- 2) Es un modelo paramétrico, lo que significa que utiliza parámetros o variables que permiten estimar el resultado final de la ecuación;
- 3) La bondad de sus resultados depende del rigor en el cálculo de los parámetros. Sin embargo, también presenta las siguientes desventajas: a) fue desarrollada en territorio de los Estados Unidos de América (EUA); b) debe validarse para otros países, ecosistemas o suelos probablemente distintos a los de EUA; c) los estudios de erosión basados en EUPS utilizan valores predeterminados para calcular R y K, llevando consigo errores de estimación; d) sobreestima la pérdida en zonas planas de precipitación abundante; e) no estima la deposición del material arrastrado; f) es totalmente empírico, esto es, tiene una capacidad limitada para extrapolar a ambientes diferentes; se basa en relaciones

Cabe destacar que, aunque sus factores (R, K, LS, C y P) fueron establecidos por Wischmeier y Smith (1962) mediante parcelas o lotes de escurrimiento. Existen métodos alternos para calcular R y K, principalmente. Por ejemplo, el factor R, se calcula con las ecuaciones de R obtenidas por Cortés (1991), el cual a través del análisis de 53 estaciones meteorológicas determinó un mapa de isoerosividad con el cual formó 14 regiones delimitadas por la erosividad de la lluvia.

Con respecto al factor K, puede ser calculado a partir de la de Edafología del INEGI, en donde a cada Unidad y subunidad de suelos se aplica un valor de susceptibilidad de suelo a erosionarse, además se considera la clase textural del suelo y se le asigna un valor conforme a la metodología de la FAO.

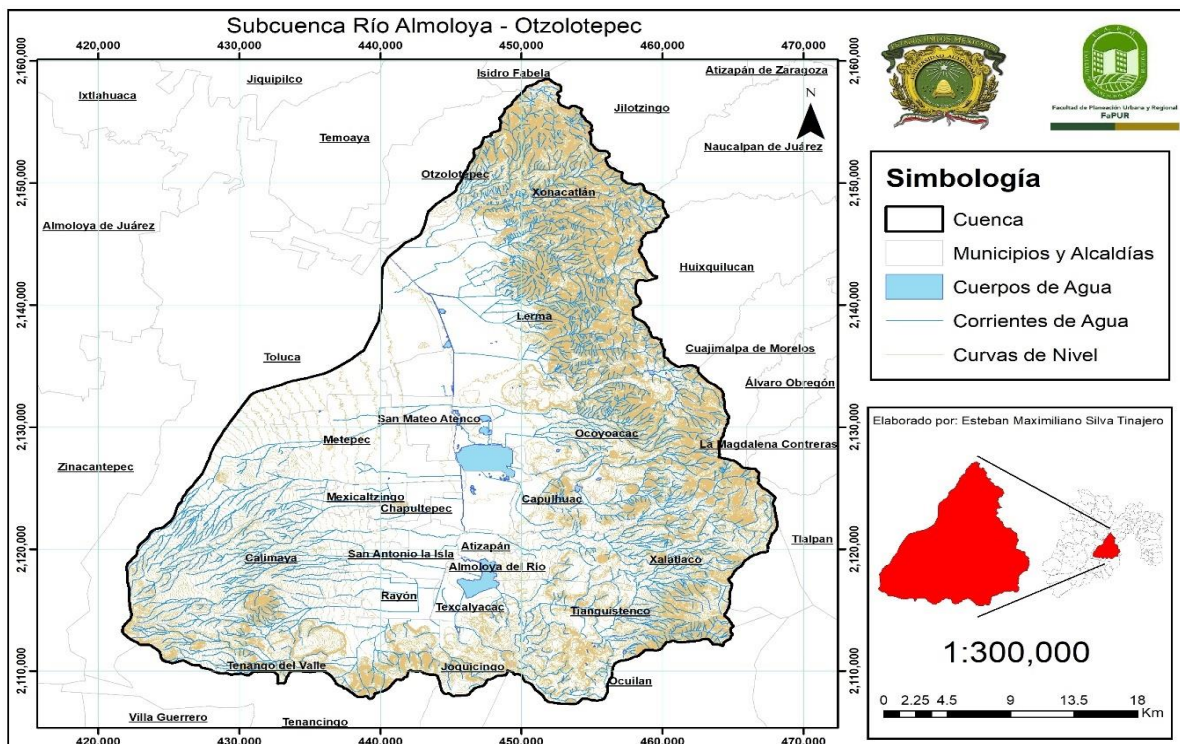
## CAPÍTULO 3. CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

En este capítulo se llevó a cabo una caracterización biofísica de la Subcuenca del Río Almoloya – Oztolotepec utilizando datos de INEGI y el Basemap de ESRI para la obtención de diferentes productos cartográficos.

### 3.1 Localización del Área de Estudio

La Subcuenca del Río Almoloya - Oztolotepec se encuentra en la zona central del oeste del Estado de México y cuenta con un área de 132, 559 hectáreas ocupando los municipios de Toluca, Calimaya, Tenango del Valle, Joquicingo, Rayón, Texcaliacac, Ocuilán, Santiago Tianguistenco, Xalatlaco, Mexicalcingo, Chapultepec, San Antonio La Isla, Atizapán, Almoloya del Río, Capulhuac, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma, Ocoyoacac, Huixquilucan, Xonacatlán, Naucalpan de Juárez, Jilotzingo, Isidro Fabela y Oztolotepec además de extenderse en menor cantidad a la Ciudad de México en las alcaldías de Tlalpan, La Magdalena Contreras y Cuajimalpa (Figura 6).

Figura 6. Localización de la zona de estudio



Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

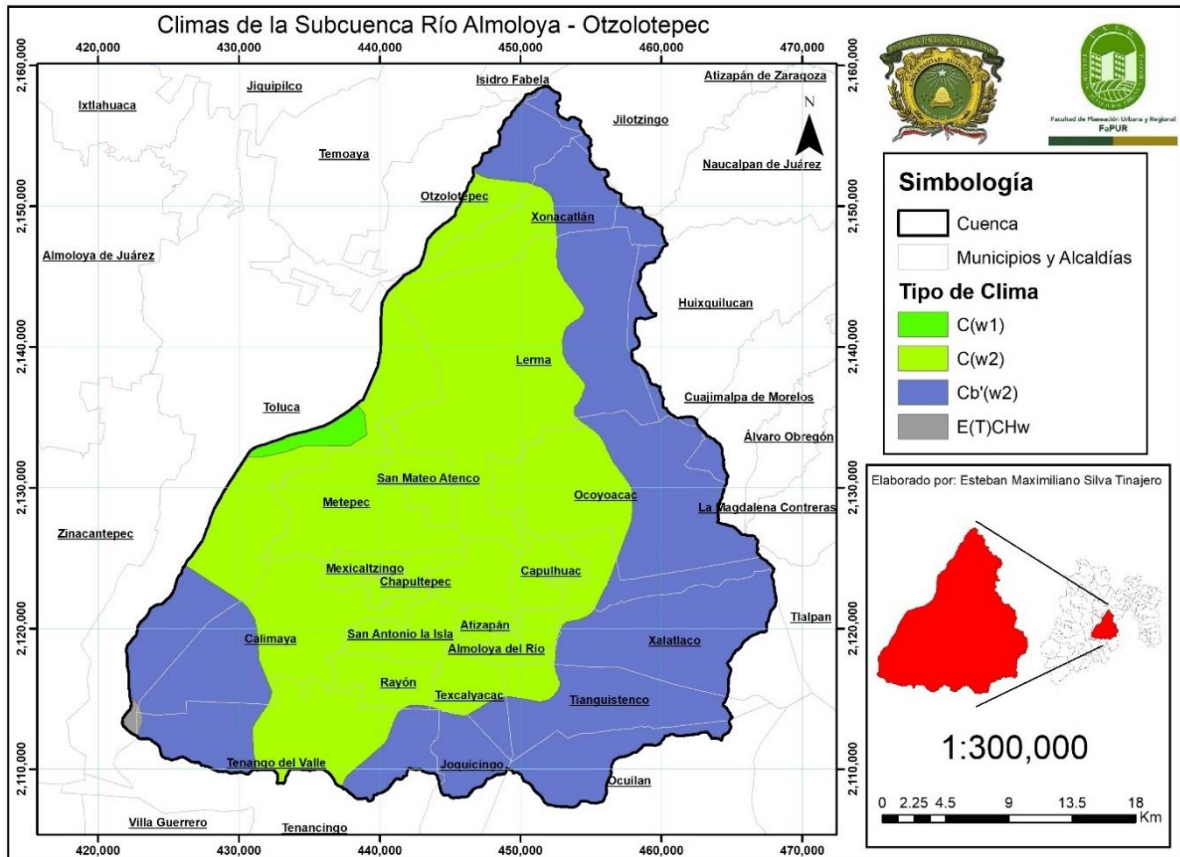
### 3.2 Clima

Se realizó el mapa de climas (Figura 7) según los datos de CONABIO (2022) que muestran que para la Subcuenca Río Almoloya - Oztolotepec existen cuatro tipos de clima:

- *C(w2)*. Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- *Cb'(w2)*. Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- *C(w1)*. Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- *E(T)CHw*. Frío, temperatura media anual entre -2°C y 5°C, temperatura del mes más frío sobre 0°C y temperatura del mes más caliente entre 0°C y 6.5°C.

Y posee una precipitación promedio anual de 875 a 1,250 mm aproximadamente.

Figura 7. Climas de la zona de estudio



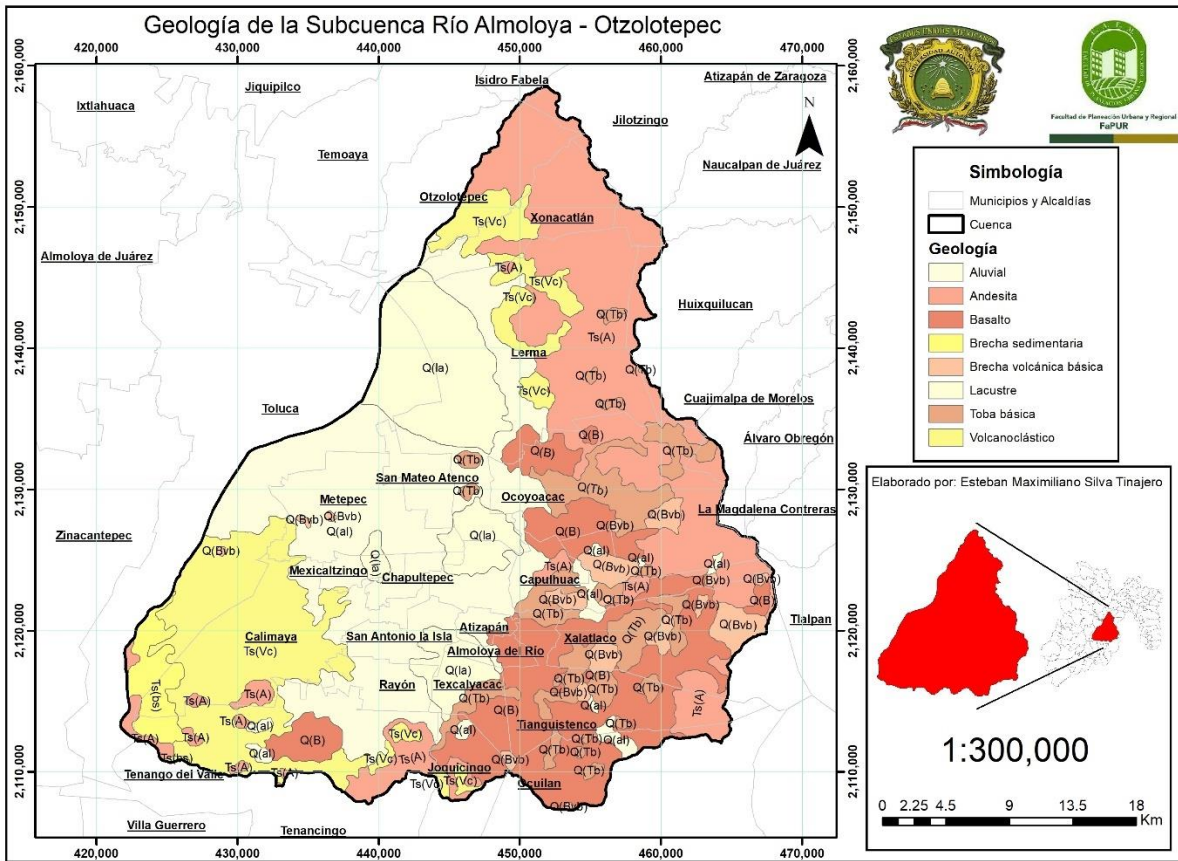
Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

### 3.3 Geología

De acuerdo con el (INEGI, 1983) la geología de la zona de estudio (Figura 10) está compuesta principalmente por rocas ígneas en las zonas montañosas mientras que en las zonas bajas de la cuenca se encuentran rocas sedimentarias, aluviales y lacustres.



Figura 10. Geología de la zona de estudio



Fuente: (INEGI, 1983)

En base al mapa (Figura 10) realizado se encontraron 8 diferentes clases para la geología:

*Aluvial.* Son descargas sólidas (sedimentos) de un curso de agua (río o quebrada) que drena desde un área topográficamente elevada a un área más baja y plana adictiva (Méndez, González, Suárez, Arauno, & Vielma, 2016).

*Andesita.* La andesita es una roca ígnea que es de composición química intermedia, es decir que tiene entre el 52% al 63% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), comúnmente suele tener textura porfídica y a veces afanítica, además, mineralógicamente se compone de anfíbol, plagioclasas y piroxenos (Maldonado, 2021).

*Basalto.* El basalto es el tipo de roca más común en la corteza terrestre; por ejemplo, los fondos oceánicos están cubiertos casi en su totalidad de basaltos. La forma más común de origen de los basaltos es a través de erupciones



volcánicas en la que la lava fluye a través de chimeneas volcánicas y se enfría y contrae en las grietas. En las erupciones de volcán de escudo, la lava se derrama a través de fisuras inundando los alrededores con el flujo de lava formando amplias mesetas (SGM, 2021).

*Brecha Sedimentaria.* Es una roca sedimentaria detrítica compuesta aproximadamente en un 50% de fragmentos angulares de roca de tamaño superior a 2 milímetros unidos por un cemento natural (Aragón Tejada, s/f).

*Brecha Volcánica Básica.* Unidad constituida por fragmentos piroclásticos de composición básica dispuestos en pseudoestratos. Los piroclásticos son: bloques, bombas y cenizas. Las brechas presentan color gris oscuro con tonos de rojo (CONAGUA, 2015).

*Lacustre.* Los depósitos lacustres provienen principalmente de los ríos, los sedimentos se depositan a lo largo de la rivera, particularmente en la desembocadura de los ríos, donde se forman abanicos aluviales o deltas, que se extienden al interior de los lagos. Las gravas y arenas se depositan en las riveras, en tanto que los limos y arcillas alcanzan el centro del lago (Díaz Rodríguez, 2005).

*Toba Básica.* Unidad piroclástica de composición básica, perteneciente al Cuaternario, constituida por pseudoestratos deleznales y compactos de ceniza volcánica y lapilli. Es de color gris oscuro que intemperiza a un color crema rojizo, se presenta en forma de planicies o como conos cineríticos (INEGI, 1992).

*Volcanoclastico.* Son aquellos producidos por actividad volcánica efusiva o explosiva formando frecuentemente cuerpos tabulares, los derivados de explosiones contienen material particulado que se transporta de una manera similar a los sedimentos (Caballero Miranda, s/f).

### **3.4 Edafología**

Según las cartas edafológicas escala 1:50, 000 de INEGI en el área de estudio existen nueve tipos de suelo que se muestran en la (Figura 8).

*Andosol.* Son suelos de origen volcánico que se forman sobre cenizas y vidrios volcánicos, así como a partir de otros materiales piroclásticos. Cuando son

jóvenes atesoran colores oscuros, siendo altamente porosos, ligeros, permeables, de buena estructura y fáciles de trabajar. Su fertilidad es considerable adecuado para la agricultura si el relieve lo permite (Ibañez & Manríquez Cosio, 2011).

*Cambisol.* Suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente, la transformación del material parental es evidente por cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato (FAO, 2008).

*Feozem.* Son suelos aptos para la agricultura en clima templado; presentan una marcada acumulación de materia orgánica y nutrientes; son de fácil manejo y alcanzan un alto grado de productividad agrícola; son susceptibles a la erosión moderada y alta; se encuentran en zonas de acumulación de materiales de poca pendiente (Pedraza Villafaña, 2015).

*Fluvisol.* Suelos desarrollados en depósitos aluviales predominantemente depósitos recientes, fluviales, lacustres y marinos en planicies aluviales, abanicos de ríos, valles y marismas costeras en todos los continentes y en todas las zonas climáticas; muchos Fluvisoles bajo condiciones naturales se inundan periódicamente (FAO, 2008).

*Histosol.* Los Histosoles comprenden suelos formados en material orgánico. Varían desde suelos desarrollados predominantemente en musgo de turba en regiones boreal, ártica y subártica, vía turba de musgos, turba de cañas/ciperáceas (pantanos) y turba de bosque en regiones templadas hasta turba de manglares y turba de bosque de pantano en los trópicos húmedos. Los histosoles se encuentran en todas las altitudes, pero la gran mayoría ocurren en tierras bajas. Los nombres comunes son suelos de turba, suelos de lodo, suelos de pantanos y suelos orgánicos (FAO, 2008).

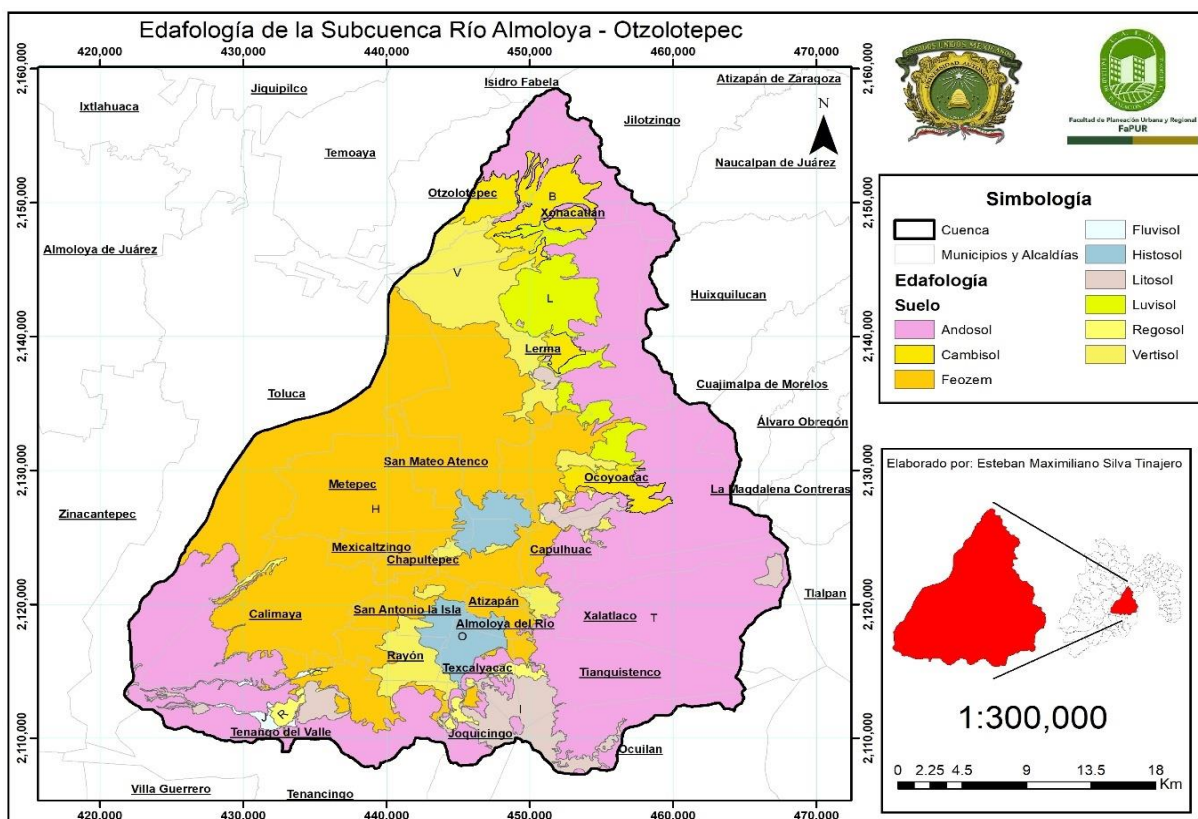
*Litosol.* Son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Los Litosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas (FAO, 2008).

*Luvisol.* Suelos con una diferenciación pedogenética de arcilla (especialmente migración de arcilla) entre un suelo superficial con menor y un subsuelo con mayor contenido de arcilla, arcillas de alta actividad y una alta saturación con bases a alguna profundidad (FAO, 2008).

*Regosol*. Son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros ni muy ricos en gravas (Leptosoles), arenosos (Arenosoles) o con materiales flúvicos (Fluvisoles). Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos (FAO, 2008).

*Vertisol*. Suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo que ocurre en la mayoría de los años, contienen elevada proporción de arcillas expandibles, o arcillas expandibles producidas por neoformación a partir de meteorización de rocas y se encuentran en depresiones y áreas llanas a onduladas, principalmente en climas tropicales, subtropicales, semiárido a subhúmedo y húmedo con una alternancia clara de estación seca y húmeda. La vegetación clímax es sabana, pastizal natural y/o bosque (FAO, 2008).

Figura 8. Edafología de la zona de estudio

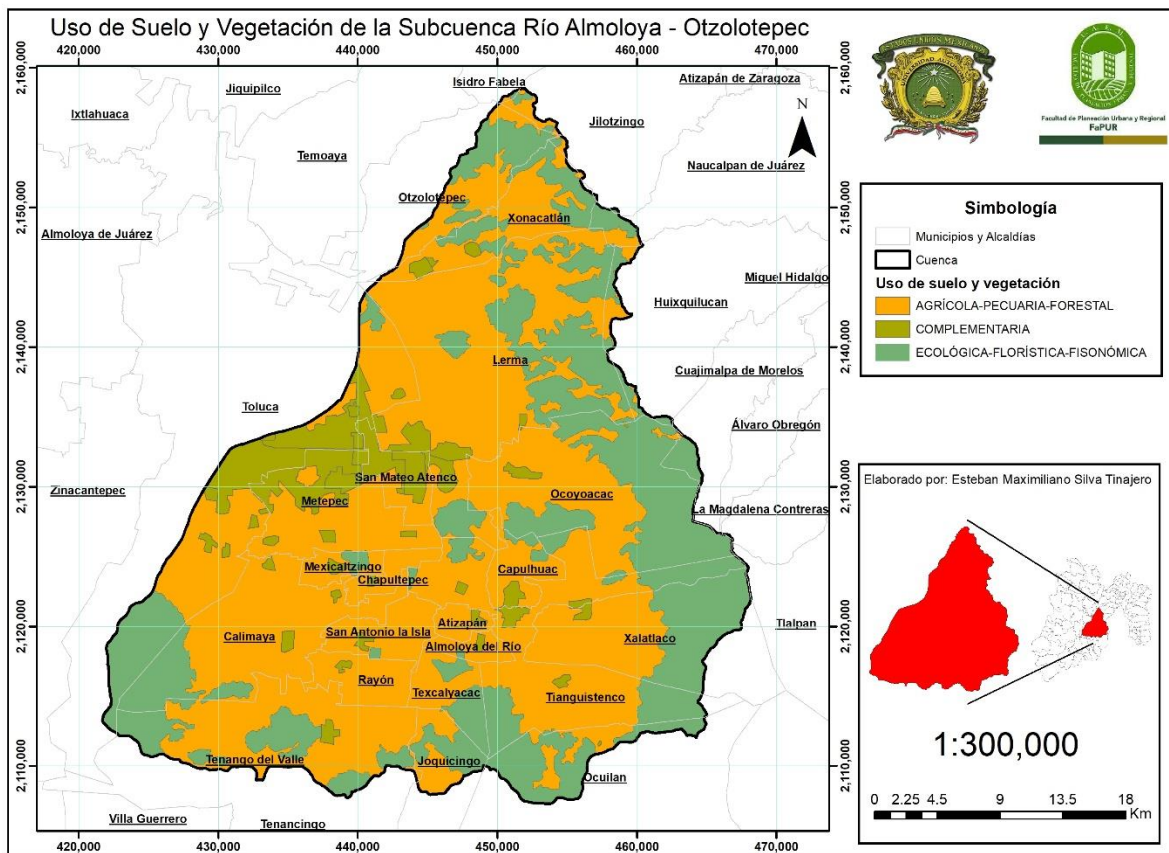


Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

### 3.5 Uso de Suelo y Vegetación

De acuerdo con el mapa realizado (Figura 9) con la información de la carta 1:250,000 de (INEGI, 2013) en el área de estudio se encontraron tres diferentes clases: Agrícola-pecuaria-forestal, complementaria y Ecológica – Florística – Fisonómica.

Figura 9. Uso de suelo y vegetación



Fuente: (INEGI, 2013)

De acuerdo con el mapa realizado (Figura 9) se encontró que el uso de suelo “Agrícola – Pecuaria – Forestal” ocupa un 62% de la superficie de la cuenca con 82, 299.37 hectáreas, el “Complementario” que se refiere a las áreas urbanas abarca un 7.81% con 10, 357.32 hectáreas y finalmente la “Ecológica – Florística- Fisonómica” ocupa un 30.1% de la superficie total del área de estudio con 39, 902.28 hectáreas.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología que se empleó para obtener los valores correspondientes a cada factor de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada y la estimación de pérdidas de suelo en ton/ha/año para la erosión potencial y actual, cada uno de los factores fue obtenido con diferentes metodologías y autores para conseguir un resultado más acercado a la realidad.

### **4.1 Cálculo de erosión hídrica del suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)**

Para poder realizar el cálculo de la erosión hídrica mediante la RUSLE fue necesario obtener los factores de erosividad de la lluvia “*R*”, erosionabilidad del suelo “*K*”, el factor conjunto de longitud y grado de la pendiente “*LS*” y el factor de cobertura vegetal “*C*” una vez teniendo todos los factores mencionados se multiplicaran los factores “*R*, *K* y *LS*” para obtener una capa ráster que al ser clasificada se obtendrá un mapa de erosión potencial, posteriormente se multiplicaran los factores “*R*, *K*, *LS* y *C*” el producto de la multiplicación será clasificado de acuerdo a la FAO para la obtención de un mapa de erosión actual.

### **4.2 Cálculo de erosividad “*R*”.**

El factor “*R*” según, Figueroa Sandoval y otros (s/f) es el producto de la energía cinética total de la lluvia por la intensidad máxima de 30 minutos y se utiliza para medir el efecto en que la erosión por salpicamiento y la turbulencia del flujo se combinan con el escurrimiento para remover del terreno las partículas de suelo separadas de este.

Para el cálculo de la erosividad de la lluvia se utilizó la ecuación número 8 (Tabla 3) propuesta por Cortés Torres H. G. (1991) quien debido a la falta de datos de estaciones meteorológicas dividió el territorio nacional en 14 regiones con referencia a la erosividad de la lluvia y formuló ecuaciones para cada una de las regiones de México.

Tabla 3. Ecuación para el Factor *R*

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
VIII	$Y = 1.9967(X) + 0.003270(X^2)$	0.98

Fuente: (Cortés Torres, 1991)

Donde:

$Y = EI_{30}$  anual (MJ mm/ha hr)

$X =$  Lluvia anual en mm

Para esto se realizó una tabla en Excel en donde se recopilaron los datos de precipitación con sus respectivas coordenadas en el sistema WGS 84 Zona 14 Norte proporcionados por las estaciones meteorológicas del archivo KMZ de (CONAGUA, 2020) que están dentro de los límites de la cuenca, así como las de sus inmediaciones.

### 4.3 Cálculo de la erosionabilidad “*K*”

La erosionabilidad del suelo se refiere a la susceptibilidad de un suelo particular a ser erosionado (Figueroa Sandoval, y otros, s/f) debido a sus propiedades ante un evento con agentes erosivos como el agua, el viento o la escorrentía.

Para calcular el factor de erosionabilidad del suelo o factor “*K*” se empleó el método de (FAO, 1980). Este método consiste en asignar valores a las unidades y subunidades del suelo según la clase textural (gruesa, media y fina). Para tal efecto se utilizó la clasificación de unidades de suelo de FAO/UNESCO (Tabla 4) y las tres clases de erosionabilidad según su textura.

Tabla 4. Unidades de suelo y su textura según FAO/UNESCO

Orden (Unidades y subunidades de suelo)	Textura			Orden (Unidades y subunidades de suelo)	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.030	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ab	0.013	0.020	0.007	M(a, g)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d, e, b)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d, e, x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Q(a, c, f, l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C(g, h, b, l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D(d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F(a, b, o, p, r)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007
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	0.053	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

Continuación de Tabla 4

Orden (Unidades y subunidades de suelo)	Textura			Orden (Unidades y subunidades de suelo)	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
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
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	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(h, k, 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	0.026	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	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Fuente: (FAO, 1980)

Para las asociaciones de suelo se sumaron los valores de cada unidad y se dividieron entre el número de unidades de suelo que conforman la asociación.

#### 4.4 Cálculo de longitud y grado de pendiente “LS”

El efecto de la topografía en la erosión se representa por el factor conjunto “LS” siendo “L” la longitud del terreno en una pendiente y “S” el grado de inclinación de la pendiente.

Para el cálculo de este factor se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) a nivel nacional de INEGI con tamaño de píxel de 15 metros el cual fue recortado a la zona de estudio utilizando la herramienta “Extract by mask” y reproyectado al sistema de coordenadas WGS 1984 Zona 14 Norte con la herramienta “Project ráster” para poder trabajar y manipular correctamente esta capa ráster.

Posteriormente, siguiendo la metodología utilizada por (Aguilar Sánchez & Gonzáles Pérez, 2014) se utilizó la herramienta “Fill” en el software Arc GIS



10.6.1 para corregir y rellenar los sumideros para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos. Si los sumideros no se rellenan, una red de drenaje derivada puede ser discontinua (ESRI, 2019).

Después se obtuvo la pendiente en grados utilizando la herramienta “Slope” para después convertir los grados en radianes utilizando el “Raster calculator” con la siguiente expresión:

$$\sin (Slope * 0.01745/0.0896)/(3 * power(\sin (Slope * 0.01745)0.8) + 0.56)$$

Al resultado se le asignó el nombre de “factor f”.

Posteriormente, se creó una capa a la que se le asignó el nombre de “Factor m” en la calculadora ráster, para lo cual se ingresó la siguiente fórmula:

$$"factor f"/(1 + "factor f")$$

Después, se determinó la dirección de flujo del área de estudio y se realizó con la herramienta “Flow direction”, en la que se ocupó el archivo FILL realizado previamente. Se le asignó el nombre de salida como FlowDir. El siguiente paso después de obtener la capa FlowDir, fue determinar la acumulación de flujo. Para ello se abrió nuevamente la caja de herramientas y se eligió “Flow Accumulation” aquí sólo se indicó el raster de entrada FlowDir y se le asignó el nombre de salida FlowAcc.

El Factor *L* se obtuvo con la calculadora ráster usando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & (Power((FlowAcc + 625), ("\"Factor_m\" + 1)) \\ & - power("FlowAcc" , ("\"Factor_m\" \\ & + 1))) / (power(25, ("\"Factor_m\" + 2)) \\ & * power(22.13, "\"Factor_m\" )) \end{aligned}$$

Mientras que el Factor  $S$  se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{con}(\tan ("Slope\_grados" * 0.01745) \\ & < 0.09, (10.8 * \sin ("Slope\_grados" * 0.01745) + 0.03), (16.8 \\ & * \sin ("Slope\_grados" * 0.01745) - 0.05)) \end{aligned}$$

Por último, solo se realizó la multiplicación de los factores “ $L$ ” y “ $S$ ” en la calculadora ráster para así obtener la capa correspondiente al factor “ $LS$ ”.

#### **4.5 Obtención del uso de suelo y vegetación actual**

El uso de suelo y vegetación actual (Figura 14) fue obtenido utilizando un método de clasificación supervisada con polígonos de entrenamiento en el software Arc GIS 10.6.1 de una composición de las bandas espectrales 2, 3, 4, 5, 6 y 7 del satélite Landsat 8 del 10 de Marzo del 2022 descargadas de la plataforma Earth Explorer del gobierno de Estados Unidos que una vez convertida a formato vectorial e integrando los micropolígonos y suavizando las líneas reveló así seis diferentes tipos de uso de suelo: Agricultura, Cuerpos de Agua, Bosque, Pastizal, Suelo Desnudo y Urbano.

#### **4.6 Cálculo del factor de cobertura vegetal “ $C$ ”**

El factor  $C$  de la USLE representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza del flujo superficial (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, s/f).

Para este factor se utilizó una capa vectorial de uso de suelo y vegetación actual mencionado anteriormente (Figura 14) posteriormente se le asignó a cada clase de uso de suelo valores de 0.01 a 1 en la tabla de atributos. Donde 0.01 es la parte del territorio más protegido ante la erosión y el valor de 1 al menor protegido esto dependiendo del tipo y la cantidad de cobertura vegetal sobre el territorio.

#### 4.7 Determinación de la erosión potencial y actual del suelo

La erosión potencial del suelo es un aproximado de la pérdida de suelo que se obtiene al realizar la multiplicación de las variables de la erosividad de la lluvia “*R*”, la erosionabilidad del suelo “*K*” y el factor de grado y longitud de la pendiente “*LS*” sin tomar en cuenta el factor de cobertura del suelo “*C*” mientras que la erosión actual del suelo se refiere a la pérdida de suelo en un momento real para estimarlo es preciso conocer factores protectores del suelo existentes en la actualidad, como la cobertura vegetal, usos del suelo y prácticas de conservación (Sanz, y otros, 2008).

Una vez obtenidos los factores “*R*”, “*K*” y “*LS*” se puede obtener la capa ráster de erosión potencial realizando la siguiente expresión en la calculadora ráster:

$$\text{Erosión Potencial} = R * K * LS$$

Después de obtener el factor “*C*” de cobertura vegetal se puede obtener el mapa de erosión actual del suelo realizando la siguiente operación en la calculadora ráster.

$$\text{Erosión Actual} = R * K * LS * C$$

Los resultados de la ecuación serán clasificados de la siguiente manera según FAO (Tabla 5):

Tabla 5. Clasificación de la erosión hídrica

Erosión Actual del Suelo	Pérdida del Suelo	
	Ton/ha/año	mm/año
Ninguna a Ligera	<10	<0.6
Moderada	10-50	0.6-3.3
Alta	50-200	3.3-13.3
Muy Alta	>200	>13.3

Fuente: (Pedraza Villafaña, 2015)

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se reportan los resultados obtenidos después de aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y ser clasificados conforme a la FAO para así obtener los mapas tanto de erosión potencial como el de erosión actual de la subcuenca y la cantidad de superficie afectada dependiendo de la cantidad de pérdidas de suelo en ton/ha/año. También se incluyen propuestas prácticas y obras de conservación de suelo y se resalta la importancia de este recurso en los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) de la Agenda 2030.

### 5.1 Factor *R* o erosividad de la lluvia

Para la obtención del factor “*R*” se utilizaron los datos de precipitación de 23 estaciones climatológicas que se ubicaran dentro y en las inmediaciones del área de estudio, esos datos fueron recolectados en la tabla 6.

En la columna llamada “Factor *R*” se aplicó la ecuación antes mencionada para obtener estos valores.

Tabla 6. Datos de estaciones climatológicas y valores de la erosividad de la lluvia.

Nombre de Estación	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación Anual (mm)	Factor R
Nevado de Toluca	417783	2114212.	1227.1	7374
San José del Contadero	415038	2127042	997	5241.1
Almoloya de Juárez	420271	2141710	744	3295.6
Capulhuac (Otzolotepec)	442760	2149568	842.8	4005.5
Temoaya	437727	2152983	977.7	5077.9
Zoológico de Zacango	431812	2122976	780.1	3547.6
Tenango	435078	2112775	808.5	3751.8

Continuación de la Tabla 6. Datos de estaciones climatológicas y valores de la erosividad de la lluvia

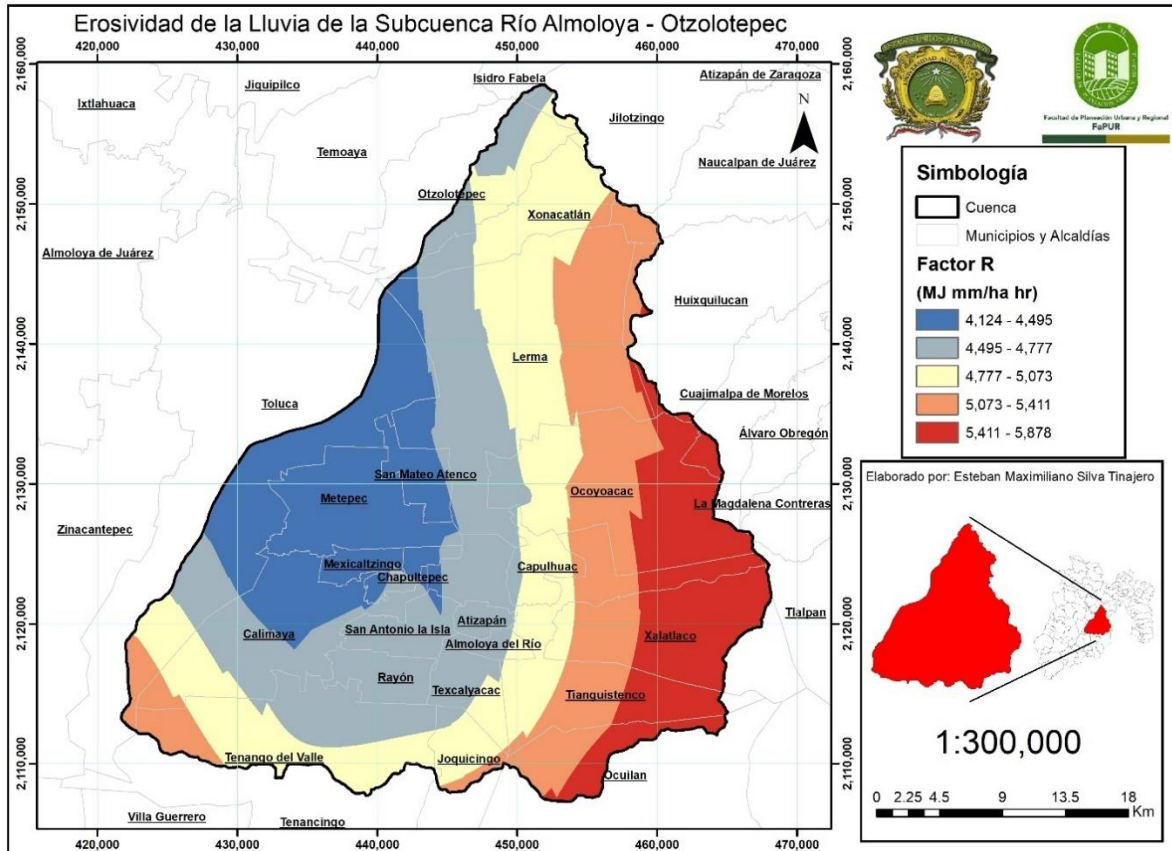
<b>Nombre de Estación</b>	<b>Coordenadas X</b>	<b>Coordenadas Y</b>	<b>Precipitación Anual (mm)</b>	<b>Factor R</b>
San Pedro Techuchulco	445219	2113572	816	3806.6
San Bartolo del Progreso	456845	2112649	934.5	4721.5
Santa Cruz Tezontepec	459376	2107849	1246.2	7566.6
Santiago Tianguistenco	450934	2120256	888.1	4352.3
Huixquilucan	463155	2140821	1141.2	6537.2
Atarasquillo	450831	2136025	876.3	4260.7
Cuajimalpa	468491	2139582	1182.9	6937.4
Santa María Nativitas	438820	2165478	912.7	4546.3
Lerma	446209	2132411	953.4	4875.9
San Bernabé	425019	2153665	831.5	3921.1
Hacienda la Y	440882	2145737	872.2	4229.1
Magdalena Chichicarpa	466112	2146988	1092.2	6081.5
Presa San Joaquín	475503	2146820	957	4905.6
Calacoaya	474879	2159822	815	3799.3
San Pedro Atlapulco	458778	2127640	1033.7	5558.1
Joquicingo	444029	2106598	1052.6	5724.7

Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

Una vez listos todos los valores de  $R$  se procedió a exportar esta tabla al software Arc GIS 10.6.1 en un formato vectorial de puntos que simbolizan las ubicaciones de las estaciones meteorológicas y en su tabla de atributos toda la información de la tabla anterior. Posteriormente se procedió a realizar una interpolación con el método de “Kriging” del campo “Factor  $R$ ” de la base de datos de los puntos.

El resultado arrojado es una imagen en formato ráster la cual fue recortada utilizando la herramienta “Extract by Mask” para adecuarse a la zona de estudio obteniendo así un factor “R” con valores de 4, 124.13 a 5, 878.99 (Figura 11).

Figura 11. Mapa de erosividad de la lluvia “Factor R”

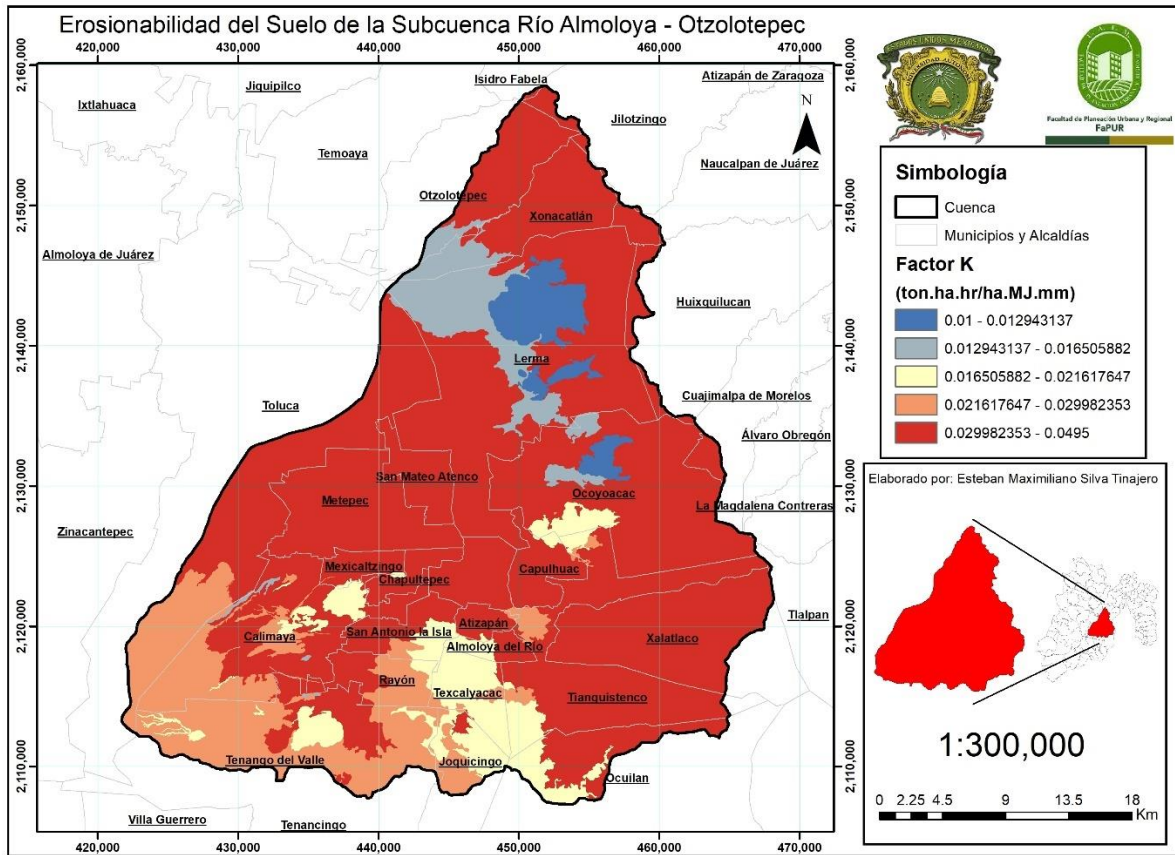


Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

### 5.1.1 Factor K

Una vez que se obtuvieron las unidades de suelo y su textura todos los datos obtenidos con la tabla fueron colocados en la base de datos de la capa vectorial de edafología en un nuevo campo de la tabla de atributos para posteriormente ser transformado a formato ráster obteniendo valores que van de 0.01 a 0.0495 (Figura 12).

Figura 12. Mapa de erosionabilidad del suelo “Factor *K*”

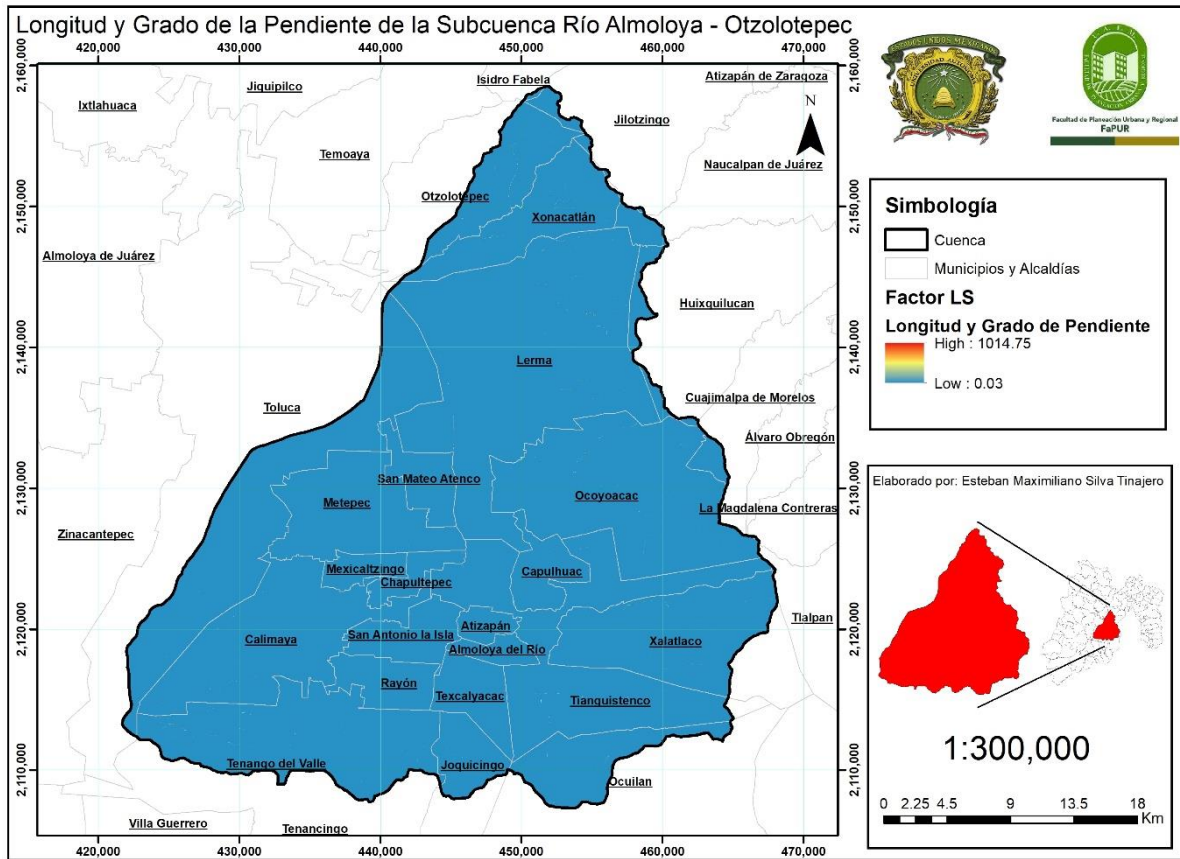


Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

### 5.1.2 Factor *LS*

Para obtener el “Factor *LS*” de grado y longitud de la pendiente únicamente se realizó la multiplicación en la calculadora ráster de los factores “*L*” y “*S*” que se obtuvieron con las ecuaciones empleadas por (Aguilar Sánchez & Gonzáles Pérez, 2014) ya mencionadas anteriormente. De este modo se obtuvo una nueva imagen ráster correspondiente al “Factor *LS*” (Figura 13).

Figura 13. Mapa de la longitud y grado de la pendiente “Factor *LS*”



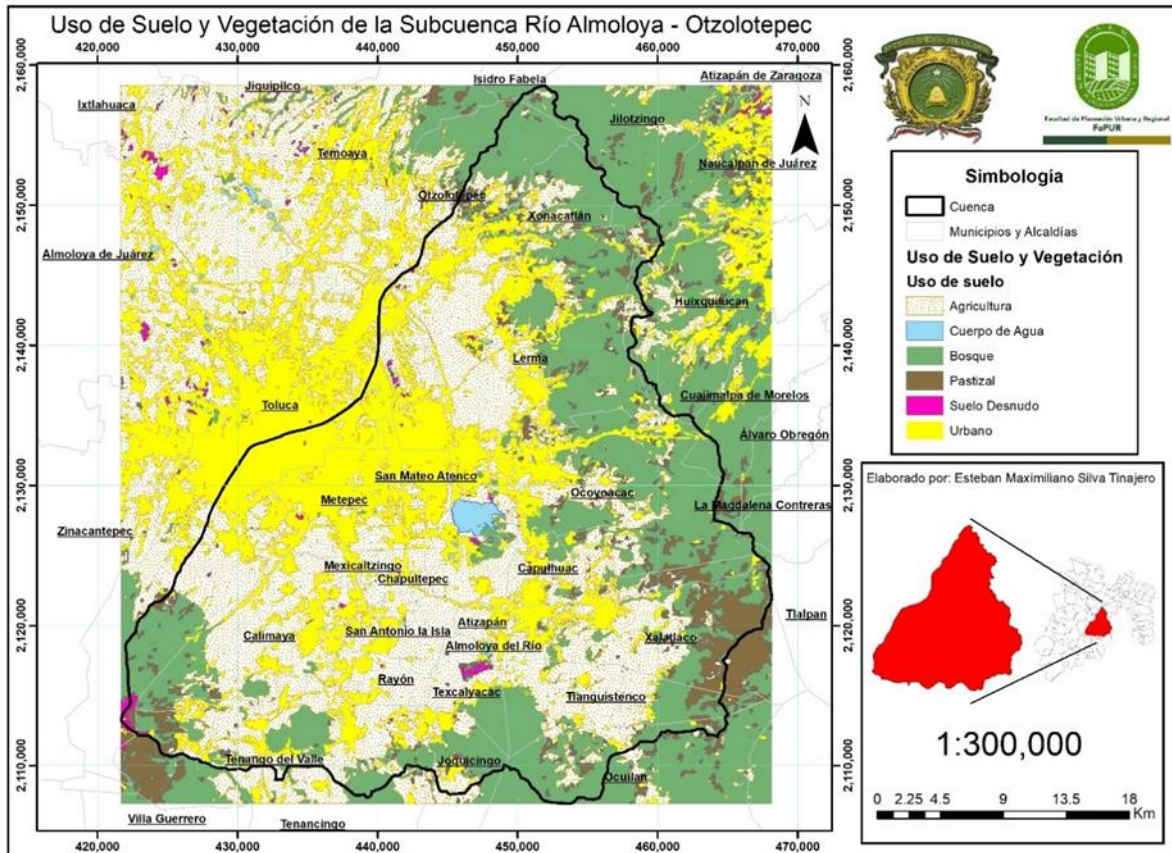
Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

## 5.2 Uso de suelo y vegetación actual

Utilizando un método de clasificación de la imagen de satélite mediante polígonos de entrenamiento se logró obtener un mapa de uso de suelo y vegetación actual (Figura 14) con las clases: “Agricultura, Bosque, Cuerpo de Agua, Pastizal, Suelo Desnudo y Urbano”.



Figura 14. Uso de suelo y vegetación actual



Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

En base al mapa se pudieron obtener los siguientes resultados (Tabla 7).

Tabla 7. Clases y superficie del uso de suelo y vegetación actual

Uso de Suelo	Superficie (hectáreas)	Porcentaje (%)
Agricultura	56,605.17	42.70
Bosque	38,048.17	28.70
Cuerpo de Agua	747.50	0.56
Pastizal	6,655.97	5.02
Suelo Desnudo	663.74	0.50
Urbano	29,838.40	22.50

Fuente: (Elaboración propia del autor, 2022)

El uso de suelo con más superficie en el área de estudio es el agrícola abarcando un 42.7% de la cuenca en zonas con media o baja pendiente en los municipios de Santiago Tianguistenco, Rayón, Calimaya, Lerma, San Antonio la Isla, Xalatlaco, Atizapán, Texcalyacac y Chapultepec mientras que la superficie forestal abarca un 28.7% de la superficie total está ubicándose en la parte alta de la subcuenca en los relieves montañosos con gran pendiente y altitud como es el caso de las faldas del Nevado de Toluca, a lo largo de la Sierra de las Cruces y el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla “La Marquesa” y en elevaciones en los municipios de Joquicingo, Tenango del Valle, Lerma, Ocoyoacac, Santiago Tianguistenco, Ocuilan, Xonacatlán, Oztolotepec, Jilotzingo y Huixquilucan.

El uso de suelo urbano corresponde al 22.5% de la superficie total del área de estudio y tiene una mayor concentración en las ciudades más pobladas del Valle de Toluca que son la ciudad de Toluca de Lerdo, Lerma de Villada, Metepec y San Mateo Atenco, también se encuentran manchas urbanas en los municipios de Santiago Tianguistenco, Capulhuac, Xalatlaco, Atizapán, San Antonio La Isla y Calimaya.

El pastizal cubre el 5.02% de la superficie de la cuenca y se concentra más en los claros de los bosques en los municipios de Xalatlaco, Santiago Tianguistenco, Oztolotepec, Lerma, Xonacatlán y Ocoyoacac además en las faldas y zonas de pasto de alta montaña del Nevado de Toluca.

A pesar de que existen 92 cuerpos de agua en la zona de estudio estos solo ocupan un 0.56% de la superficie de la cuenca, de acuerdo con (INEGI, 2019) los cuerpos de agua que cuentan con mayor superficie en la zona de estudio son el Lago Laguna de Lerma con 803.2 hectáreas, la Laguna Chignahuapan con una superficie de 431.8 y el canal del Río Lerma con 50.8 hectáreas.

Finalmente, el suelo desnudo que solo ocupa el 0.50% de la superficie total de la zona de estudio (comprendiendo como suelo desnudo aquella superficie desprovista de cobertura vegetal o urbana que no está destinada a una actividad agrícola), este se encuentra principalmente en el cráter del volcán Nevado de Toluca y en los municipios de Texcalyacac y Lerma cerca de terrenos agrícolas y pastizales.

### 5.3 Factor C

Para obtener la capa correspondiente al “Factor C” se obtuvo primero el mapa de uso de suelo y vegetación actual (Figura 14) utilizando una técnica de teledetección de imágenes de satélite recientes para garantizar una caracterización lo más apegada a la actualidad. Una vez obtenido la capa de uso de suelo y vegetación en formato vectorial se le asignaron los siguientes valores a cada clase en un nuevo campo de la tabla de atributos (Tabla 8).

Tabla 8. Valores asignados para el “Factor C”

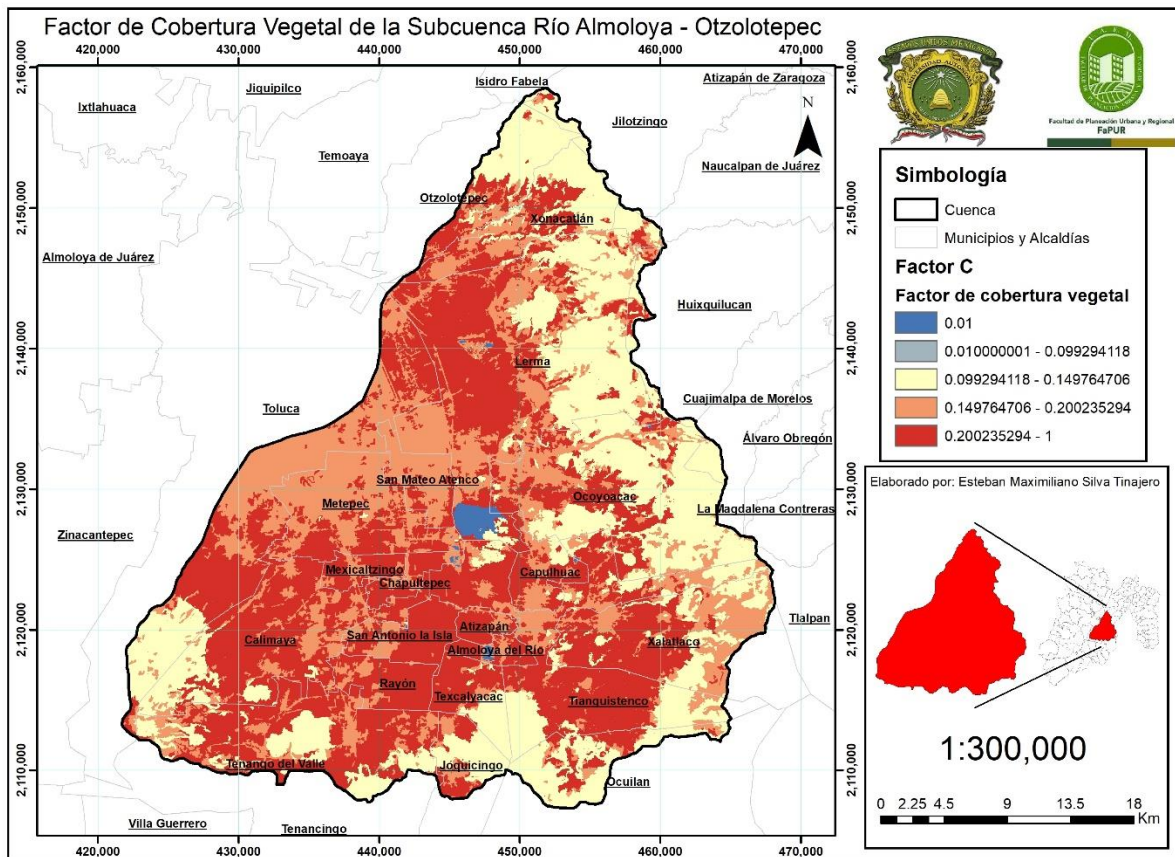
<b>Uso de Suelo y Vegetación</b>	<b>Valores del Factor C</b>
Agricultura	0.8
Cuerpos de Agua	0
Bosque	0.01
Pastizal	0.2
Suelo Desnudo	1
Urbano	0.15

Fuente: Elaboración propia

Cuando el valor es igual a 1 se considera que no existe vegetación y que el suelo se encuentra en barbecho continuo, a medida que aumenta la cobertura vegetal tanto en densidad como en frecuencia este valor tiende a disminuir (Martínez Ménez , 1983).

Teniendo estos datos en la tabla de atributos se realizó la conversión a formato ráster con el campo de “Factor C” para obtener su capa correspondiente (Figura 15).

Figura 15. Mapa del factor de cobertura vegetal “Factor C”



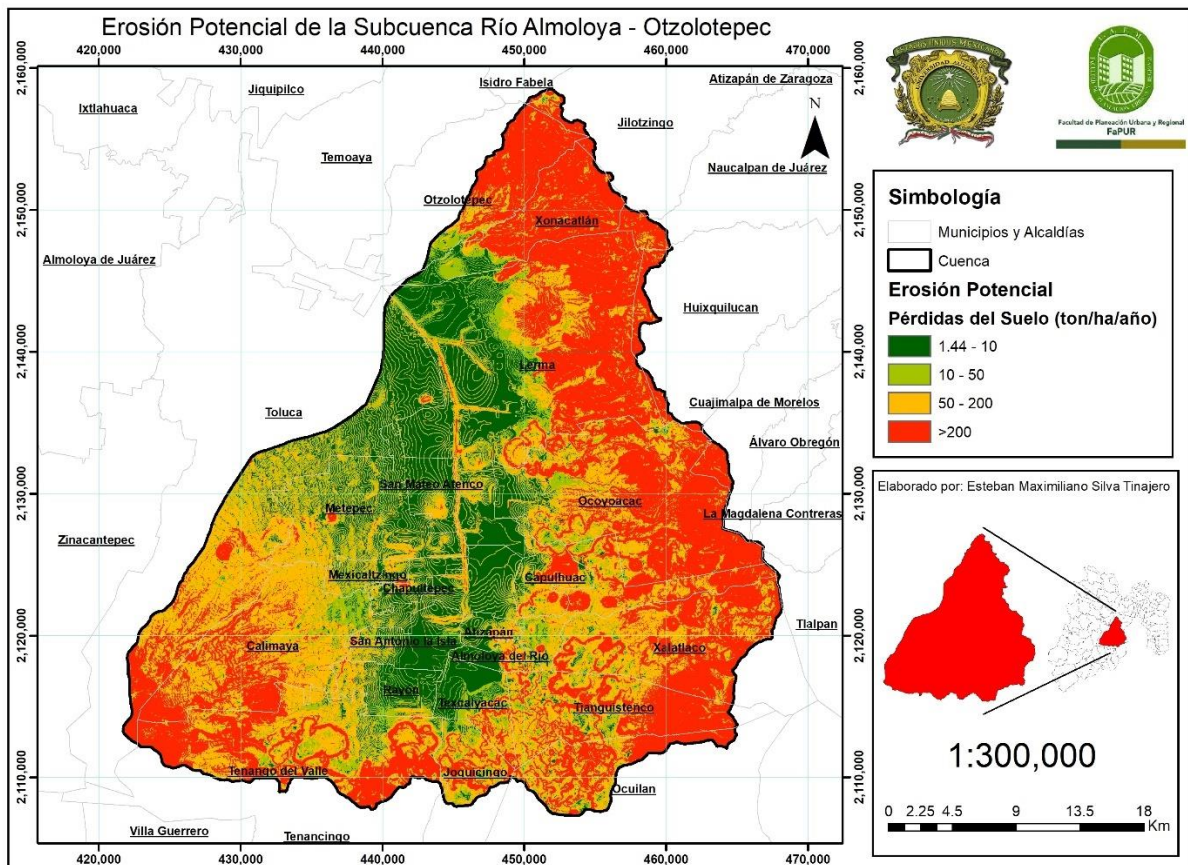
Fuente: Elaboración propia

## 5.4 Erosión Potencial

Después de realizar la multiplicación de los factores  $R$ ,  $K$  y  $LS$  en la calculadora ráster y clasificarlo según la (Tabla 5) se obtuvo el mapa de la erosión potencial (Figura 16).



Figura 16. Mapa de la erosión potencial del suelo



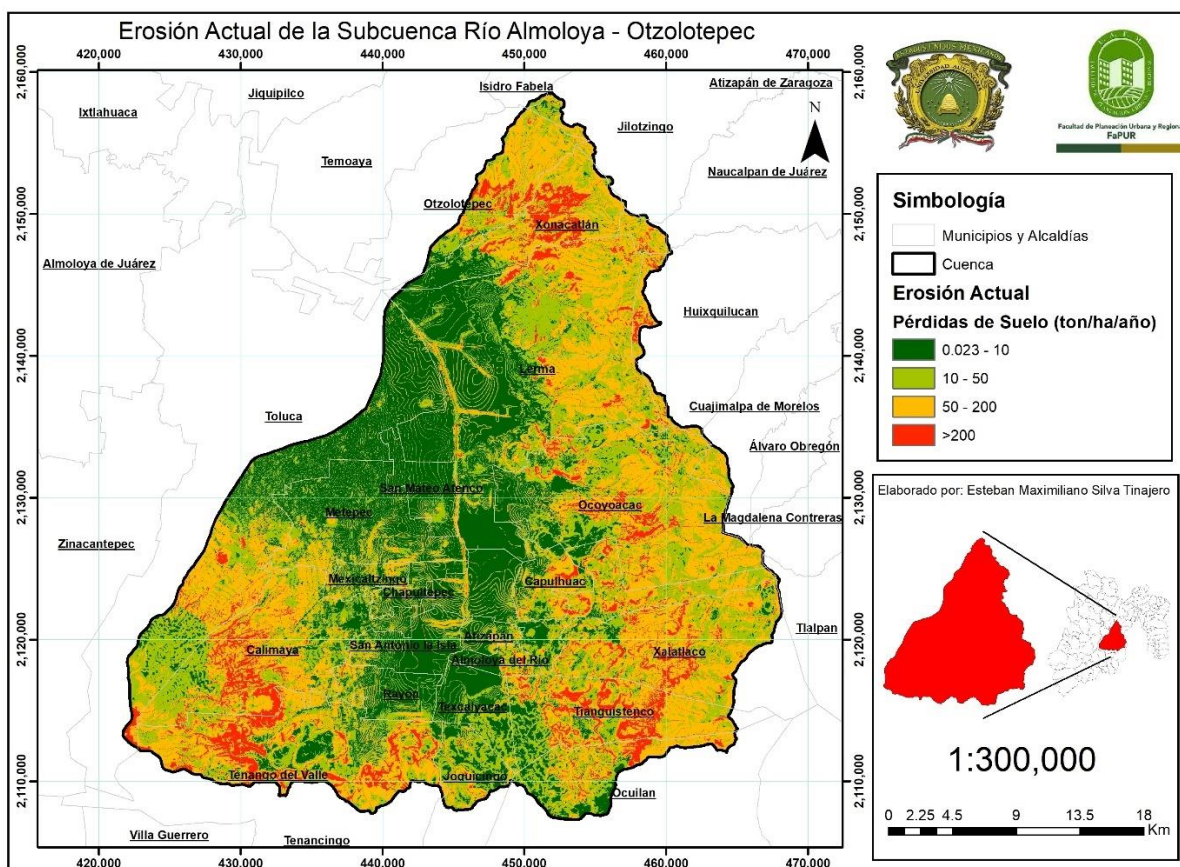
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el mapa anterior (Figura 16) la erosión potencial más severa abarca toda la parte Este de la Subcuenca, el Norte y el Suroeste en donde las pendientes son más altas debido al relieve de la Sierra de las Cruces y el Nevado de Toluca.

### 5.5 Erosión Actual

Después de incorporar el factor de cobertura vegetal o “Factor C” a la multiplicación de la erosión potencial se obtuvo el mapa de erosión actual (Figura 17).

Figura 17. Mapa de la erosión actual del suelo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Cantidad de superficie afectada por la erosión hídrica

Erosión Actual del Suelo	Pérdida del Suelo (ton/ha/año)	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Ninguna a Ligera	0.023-10	39,752.62	29.98
Moderada	10-50	36,447.09	27.49
Alta	50-200	47,108.86	35.53
Muy Alta	>200	9,021.48	6.80

Fuente: Elaboración propia

La zona de estudio cuenta con un área de 132,559 hectáreas de las cuales 29.98% tienen una pérdida ligera o nula de suelo al año mientras que el 27.49% presenta pérdidas moderadas y el 35.53% presenta una alta pérdida de suelo, por otra parte, solo el 6.80% de la superficie de la cuenca presenta una pérdida de suelo muy alta (Tabla 9).

La erosión clasificada como Alta es la que más superficie afecta a la Subcuenca del Río Almoloya – Oztolotepec, esta se encuentra con más densidad en toda la parte Este de la subcuenca en donde se encuentra el relieve montañoso de la Sierra de las Cruces lo que facilita el desprendimiento y transporte de las partículas de suelo cuesta abajo por las laderas de gran pendiente por acción combinada de la gran cantidad de precipitación registrada en esa superficie y la gravedad.

También se encontró una pérdida alta de suelo en la parte del Suroeste en las faldas del volcán Nevado de Toluca en donde existe una gran cantidad de terrenos de uso agrícola lo cual aumenta la exposición del suelo a ser erosionado por la lluvia debido a los trabajos de arado en especial cuando estos se ubican en zonas con pendiente y los surcos de arado son hechos de forma paralela a la pendiente, siendo los municipios más afectados Oztolotepec, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Santiago Tianguistenco, Xalatlaco, Ocuilan, Tenango, Calimaya y Toluca.

La erosión Muy Alta pese a presentarse en un pequeño porcentaje de la zona de estudio es muy relevante ya que se pierde 200 o más ton/ha/año de suelo, esta se ubica principalmente en las partes Norte, Sureste y Suroeste de la subcuenca en terrenos agrícolas sobre relieves montañosos en los municipios de Xonacatlán, Oztolotepec, Ocoyoacac, Santiago Tianguistenco, Calimaya y Tenango.

Por otra parte, la erosión Moderada tiene su mayor densidad en la parte Norte, Este, Sur y Suroeste de la cuenca sobre pastizales, áreas forestales y áreas urbanas con una pendiente media en los municipios de Lerma, Ocoyoacac, Toluca y Joquicingo.

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca existe una fragmentación e insuficiencia de áreas verdes urbanas (cantidad y calidad). Estos espacios verdes al interior de la urbe incrementan su relevancia debido a que son espacios que propician calidad (García García, 2022) no solo para la ciudad sino también para mitigar problemas ambientales como la contaminación del aire, agua y de erosión que puede llegar a afectar la infraestructura urbana.

Finalmente, la erosión Baja o Nula se puede encontrarse con mayor densidad en toda la parte central y al Oeste de la subcuenca en espacios con pendiente nula a baja con un uso de suelo urbano, agrícola, forestal y cuerpos de agua en los municipios de Metepec, Toluca, Lerma, Xonacatlán, San Mateo Atenco, Santiago Tianguistenco, Almoloya del Río, Atizapán, San Antonio la Isla, Texcalyacac, Rayón y Chapultepec.

A modo de resumen se presenta un nivel medio – alto de pérdidas de suelo por erosión hídrica en el área de estudio debido a que la erosión clasificada como “Alta” se presenta en un 35.53% de la cuenca y la erosión “Moderada” en un 27.49% lo cual implica que haya una pérdida de suelo de 10 hasta 200 ton/ha/año en un 63.02% de la superficie de la subcuenca lo cual se traduce en 83, 538.68 hectáreas afectadas.

## **5.6 Propuesta de obras y prácticas de conservación de suelos**

En este apartado se encuentran enlistadas una serie de técnicas para la conservación del suelo ante la erosión hídrica y se resalta la gran importancia de este recurso para los ODS de la Agenda 2030.

### **5.6.1 Prácticas vegetativas**

*Rotación de cultivos:* Una rotación de cultivos tiene como objetivo el desarrollo de sistemas de producción diversificados que aseguren la sostenibilidad del suelo promoviendo cultivos que se alternen año con año para que mantengan la fertilidad del suelo y reduzcan los niveles de erosión. Los cultivos que se alternan año con año pueden ser cultivos en surcos después de cultivos de granos pequeños, cultivos de grano pequeño después de leguminosas, gramíneas después de unas leguminosas y una variación de alternancia de cultivos que depende de las condiciones agroecológicas de la región (Morales Flores & Martínez Menez, s/f).

*Mantener la vegetación y evitar el suelo desnudo:* De acuerdo con (Cotler, 2020) esto lo podemos lograr evitando o minimizando la entrada de animales el pastoreo al lugar o restringiéndolo de aquellas actividades que tienen un impacto negativo sobre la vegetación. Así las plantas cubrirán el suelo,



reduciendo la erosión por viento y lluvia, y las raíces ayudarán a sujetarlo. Si nada crece por sí solo, puedes plantar leguminosas o vegetación de rápido crecimiento que se desarrolle en sitios cercanos (p. ej. frijol, lenteja, haba, chícharo, cacahuete, trébol, mezquite, huizache, maguey, nopal, entre otros). Estas plantas son capaces de fijar nitrógeno atmosférico, por lo que ayudan a la fertilidad de los suelos, y sus flores son llamativas en cuanto a forma y colores, atrayendo polinizadores. Se debe evitar a toda costa plantar especies que no sean de la zona, ya que podríamos introducir individuos que compitan con las especies locales y reduzcan la biodiversidad de tu terreno.

*Revegetación de cauces:* Según (Loredo Osti, Béltran López, Moreno Sánchez, & Casiano Domínguez, 2007) esto debe ser realizado con especies de plantas silvestres nativas para que las raíces puedan sujetar y estabilizar el suelo y si es posible reorientar el cauce de los escurrimientos hacia obras de almacenamiento o derivación como tinas ciegas para controlar el flujo de agua superficial.

*Abonos verdes:* Se trata de tallos de la cosecha anterior y una serie de plantas que se incorporarán cuando se hayan desarrollado bastante, pero justo al inicio de la floración, una vez cortados, los dejamos sobre la tierra varios días o semanas según el clima (mínimo cuatro días) y se incorporan superficialmente sin enterrarlos para evitar fermentaciones anaerobias (Guanche García, 2021).

### **5.6.2 Prácticas mecánicas**

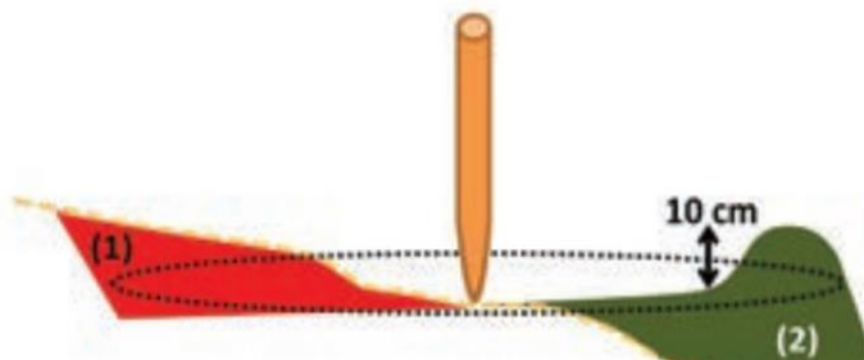
*Bordos en curvas de nivel:* Es un sistema de bordos que se conforma con el producto de la excavación del suelo o subsuelo, de forma perpendicular a la pendiente del terreno, siguiendo curvas a nivel. Los bordos se pueden realizar con maquinaria o aperos de labranza, en combinación con instrumentos manuales. Sirven para propiciar la interceptación de azolves y escurrimientos, así como aumentar reforestaciones y vegetación nativa. Esta obra se debe implementar en suelos que tengan como mínimo 60 centímetro de profundidad, ya que en suelos con poca profundidad no se contaría con suficiente material para levantar el bordo (CONAFOR, 2018).

*Terrazas individuales:* Es un terraplén de forma circular de un mínimo de 50 cm de radio, construido a nivel o en contrapendiente, sobre el cual se establece

alguna especie forestal en el centro de esta (Figura 18). Esta práctica está asociada a la reforestación por lo que el número de piezas por hectárea debe ser acorde a la densidad de plantas a reforestar, y puede ser construida en un margen muy amplio de pendientes, siempre y cuando exista la profundidad adecuada. No se debe realizar en suelos con profundidad menor a 10 centímetros. Su principal objetivo es captar agua de los escurrimientos superficiales para aumentar la humedad disponible para las plantas.

Con el producto de la excavación se construye el bordo de al menos 10 cm de alto, pendiente abajo, en forma de medialuna, para conducir los escurrimientos hacia las terrazas ubicadas en la curva. El bordo se compacta y suaviza para proporcionar estabilidad y facilitar la instalación de vegetación arriba del mismo, en la siguiente curva las terrazas serán puestas de tal manera que formen un diseño tresbolillo con respecto a la curva anterior (CONAFOR, 2018).

Figura 18. Terraza individual



Fuente: (CONAFOR, 2018)

*Surcado al contorno:* Consiste en construir surcos perpendiculares al sentido de la pendiente del terreno, siguiendo las curvas de nivel por ejemplo, sobre la ladera de un cerro. Esta práctica es recomendable en terrenos con pendiente hasta del 5 %. Cuando la pendiente es mayor, es necesario complementarla con otras prácticas mecánicas como son las terrazas. Por otra parte este sistema no es recomendable en regiones muy lluviosas y de suelos arcillosos o que descansan sobre un subsuelo impermeable, ya que en esas condiciones, el

exceso de agua perjudica el desarrollo de los cultivos (Vivas Enríquez, y otros, 2014).

## **5.7 El suelo y los ODS de la Agenda 2030**

Como actor global, México participó activamente en la definición de la Agenda. El país fue uno de los más activos en los foros de consulta, participando y liderando el proceso de negociación. No solo presentó propuestas puntuales para incorporar los principios de igualdad, inclusión social y económica, e impulsó que la universalidad, sostenibilidad y los derechos humanos fuesen los ejes rectores de la Agenda 2030. También abogó por la adopción de un enfoque multidimensional de la pobreza que, además de considerar el ingreso de las personas, tomara en cuenta su acceso efectivo a otros derechos básicos como la alimentación, educación, salud, seguridad social y servicios básicos en la vivienda (ONU, 2022).

El suelo al igual que otros recursos naturales está estrechamente relacionado con el bienestar del ser humano y el equilibrio de las diferentes esferas ambientales. El cuidado del recurso suelo ante los efectos negativos de la erosión hídrica garantiza el cumplimiento a varios ODS de la Agenda 2030 como:

### *Hambre cero*

Las personas de todo el mundo comparten la necesidad común de alimentos inocuos, nutritivos y fiables. La agricultura tiene una importancia fundamental para los países en desarrollo, porque el buen funcionamiento del sector agrícola es esencial para garantizar la seguridad alimentaria, y los productos agrícolas son una fuente principal de ingresos nacionales. Los cambios en los patrones de aprovechamiento de la tierra debido a la desertización, erosión, la salinidad y el cambio climático afectan a la disponibilidad de alimentos y aumentan sus precios, lo que puede hundir a millones de personas más en la pobreza y el hambre (IAEA, s/f). El buen estado del suelo es la base de una buena producción agrícola por lo que el cuidado y la conservación de este recurso es fundamental para garantizar una seguridad alimentaria óptima a niveles tanto locales como nacionales.

### *Agua limpia y saneamiento*

Suelo y agua son recursos estratégicos que contribuyen a la seguridad alimentaria y la generación de servicios ecosistémicos.

El manejo del suelo puede afectar significativamente a la cantidad y calidad de agua disponible en una cuenca (FAO, 2022). En el momento en que el agua llega a la superficie del suelo, ya sea por precipitación o por el riego artificial, se infiltra en el suelo por gravedad; de esa manera el agua llena progresivamente todos los poros del suelo, grietas y fisuras, alcanzando así su máxima capacidad para almacenar agua. En este caso, el agua de lluvia ya no podrá almacenarse en el suelo, pero podrá utilizarse para la recarga de los arroyos o ríos y de esta manera contribuye en el mantenimiento de los caudales ecológicos de los cuerpos de agua superficiales (INECOL, 2021). Vale destacar en esta sección que el suelo es un excelente reservorio de humedad, lo que reafirma la conveniencia de manejar integralmente suelo y agua.

### *Ciudades y comunidades sostenibles*

Un elemento que se encuentra estrechamente ligado con el uso del suelo es la vivienda, la que establece desigualdades sociales en la ciudad, en relación principalmente a los niveles de ingresos, al acceso a los servicios públicos y al suelo mismo (PAOT, 2003). La buena calidad de viviendas e infraestructura depende directamente de las características del suelo en el que se construyen y desarrollan. El suelo urbano es la base del patrimonio de las familias mexicanas, un bien indispensable para crear las condiciones apropiadas de habitabilidad en las ciudades, por ello, tener acceso a este bien material es considerado en los planes de desarrollo como un factor de equidad social (Ávila García, 2014).

Por ende, realizar zonificaciones, ordenamientos y planes de desarrollo tomando en cuenta el suelo y sus propiedades para la planificación de ciudades y comunidades es necesaria para aumentar la calidad y sostenibilidad tanto de ambientes rurales como urbanos.

### *Acción por el clima*

Los suelos son la mayor fuente y reservorio de carbono (C) en los ecosistemas terrestres, y son la vía principal por la cual el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) fijado por las plantas es retornado a la atmósfera. La emisión de CO<sub>2</sub> de los suelos a la atmósfera ocurre principalmente por la respiración de raíces y organismos heterótrofos. Una contribución importante para abatir el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es incrementar los reservorios de C edáfico, el cual tiene tiempos medios de residencia más prolongados que la vegetación. En este sentido, las tierras de pastoreo juegan un papel importante en el secuestro de C, ya que los pastizales contribuyen a mitigar el cambio climático global al almacenar C en la biomasa por el proceso de la fotosíntesis y en el suelo por el ciclo del C (Céspedes Flores, Fernández, Gobbi, & Bernardis, 2012) así reduciendo y almacenando por más tiempo las emisiones causantes del cambio climático.

Restaurar los suelos que están actualmente degradados podría eliminar hasta 63 000 millones de toneladas de carbono, lo que compensaría un pequeño pero importante porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero. Muchas zonas naturales y seminaturales actúan como potentes defensas frente a los efectos del cambio climático (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2019) ya que el suelo no ha sido afectado significativamente por efectos del ser humano y puede soportar buenas coberturas vegetales como densos bosques, selvas o pastizales naturales.

### *Vida de ecosistemas terrestres*

De los suelos provienen todos los ecosistemas terrestres y su adecuada conservación son la mejor manera para que los ecosistemas puedan desarrollarse y seguir contribuyendo con sus servicios ecosistémicos como lo son la captura de carbono, almacenamiento y distribución de agua de buena calidad, belleza de paisaje o escénica, proveer de alimentos nutritivos y proliferación de la diversidad biológica. Para el caso de México se pueden agrupar en 10 sistemas: bosques, selvas, matorrales, manglar, otra vegetación hidrófila, otros tipos de vegetación, pastizal natural, vegetación halófila y gipsófila (SEMARNAT, 2015).

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se estimó la pérdida de suelo por erosión hídrica en sus formas laminar y canalillos a través de un método indirecto, en la subcuenca del Río Almoloya – Oztolotepec. Este método es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés). La ecuación consta de seis factores y el último de ellos que es el de prácticas mecánicas “P”, este no se consideró debido a que se identificó que no existen dichas prácticas en las áreas agrícolas de la zona de estudio.

Para los factores de erosividad de la lluvia “R”, erosionabilidad del suelo “K”, longitud y grado de la pendiente “LS” y la cobertura vegetal del suelo “C”, sus valores fueron obtenidos mediante metodologías alternativas que se reportan en la literatura. Además, otra innovación fue que para cada factor se elaboró un mapa en el Sistemas de Información Geográfica ArcGIS, lo cual facilitó la manipulación de la información y los cálculos correspondientes y así se elaboraron las capas de erosión actual y potencial del suelo en formato ráster.

Igualmente se elaboró el mapa de uso de suelo y vegetación con imágenes de satélite con la finalidad de tener información de cada uno de los usos de suelo y de otras coberturas, a las cuales se les asignó un valor y que representa el factor “C”.

Los resultados de la erosión actual mostraron que la mayor cantidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica son las clasificadas como Altas debido a que se pierden de 50 a 200 ton/ha/año en un 35.53% de la superficie del área de estudio seguida de la erosión Nula a Ligera que para este caso va de 0.023 a 10 ton/ha/año y que afecta al 29.98% seguida muy de cerca por la erosión Moderada de 10 a 50 ton/ha/año afectando un 27.49% del territorio y por último aparece la erosión Muy Alta con pérdidas superiores a las 200 ton/ha/año que solo afectan al 6.8% de la superficie total de la subcuenca.

Con base a los resultados de las pérdidas de suelo por erosión hídrica es importante establecer estrategias de conservación del suelo a fin de evitar su deterioro y un impacto en su productividad y en las de los cultivos, además de prevenir impactos ambientales negativos fuera de la subcuenca.

Se requiere formular un programa de conservación de suelos para las áreas agrícolas, pecuarias y forestales, considerando el grado de erosión que presenten estas y acordes con las condiciones geográficas y climáticas. Se requiere el asesoramiento técnico del personal de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER).

En cuanto a la hipótesis de la tesis se concluye que se cumplió ya que fue posible conocer el grado de erosión y las zonas que presentan diferentes niveles de erosión en la subcuenca, y a partir de ello es posible diseñar un programa de conservación de suelos.

Finalmente, y con respecto al objetivo general se cumplió ya que se calcularon las pérdidas de suelo por erosión hídrica en la Subcuenca Río Almoloya-Otzolotepec utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada.

## Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (5 de Diciembre de 2019). El suelo, la tierra y el cambio climático. *Eionet*. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2019/articulos/el-suelo-la-tierra-y>
- Aguilar Sánchez, G., & Gonzáles Pérez, N. S. (2014). *Evaluación de erosión hídrica mediante la ecuación universal de pérdida de suelo en el Municipio de Acámbaro, Guanajuato*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Alba Alonso, S., Alcázar Torralba, M., Carreño Martín, F. I., & Barbero Abolafio, F. (2011). EROSIÓN Y MANEJO DEL SUELO. IMPORTANCIA DEL LABOREO ANTE LOS. En S. Alba Alonso, M. Alcázar Torralba, F. I. Carreño Martín, & F. Barbero Abolafio, *Agricultura Ecológica* (págs. 13-39). Madrid.
- Alvarado Cardona, M., Colmenero Robles, A. J., & Valderrábano Almegua, M. D. (3 de Noviembre de 2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317-326. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/104/10414309.pdf>
- Aragón Tejada, J. (s/f). Obtenido de es.scribd.com: <https://es.scribd.com/document/265208675/Brecha-sedimentarias#>
- Ávila García, I. (2014). *La importancia del suelo en las ciudades*. Instituto Municipal de Planeación y Competitividad de Torreón, Torreón. Obtenido de <http://www.trcimplan.gob.mx/blog/importancia-suelo-ciudades.html>
- Bagarello, V., Di Stefano, C., Ferro, V., & Pampalone, V. (1 de Marzo de 2017). Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models. *Catena*, 10-19.
- Barahona, E. (s/f). *edafologia.ugr.es*. Obtenido de <http://edafologia.ugr.es/conta/tema10/tipos.htm>
- Baumann, J., & Arellano Monterrosas, J. L. (2003). Measuring rainfall erosivity characteristics and annual R-factors for adjustment of the USLE in a tropical climate. (D. Gabriels, & W. Cornelis, Edits.) 66-74.
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*. Manhattan, Kansas, USA: Springer. Obtenido de [http://water.lecture.ub.ac.id/files/2018/08/1.-Book\\_\\_Principles-of-Soil-Conservation-and-Management.pdf](http://water.lecture.ub.ac.id/files/2018/08/1.-Book__Principles-of-Soil-Conservation-and-Management.pdf)
- Bojórquez Serrano, J. I., Castillo Pacheco, L., Hernández Jiménez, A., García Paredes, J. D., & Madueño Molina, A. (Diciembre de 2015). CAMBIOS EN LAS RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO BAJO DIFERENTES COBERTURAS. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 63-69. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193243175008>
- Bolaños Gonzáles, M., Paz Pellat, F., Cruz Gaistardo, C. O., Argumedo Espinoza, J. A., Romero Benítez, V. M., & De la Cruz Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3). Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00271.pdf>



- Burbano Orjuela, H. (10 de Agosto de 2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n2/v33n2a11.pdf>
- Caballero Miranda, C. (s/f). *Rocas volcanoclasticas*. UNAM, Facultad de Ciencias, Ciudad de México. Obtenido de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/15RsVolcanoclast4X.pdf>
- Cartón, A. (21 de Septiembre de 2021). *.ecologiaverde.com*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-erosion-2418.html>
- Castro Mendoza, I. (Agosto de 2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2). Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382013000200001&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382013000200001&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Céspedes Flores, F. E., Fernández, J. A., Gobbi, J. A., & Bernardis, A. C. (Marzo de 2012). Reservorio de carbono en el suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Fitotec*, 35(1). Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802012000100011#:~:text=Los%20suelos%20son%20la%20mayor,es%20retornado%20a%20la%20atm%C3%B3sfera](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000100011#:~:text=Los%20suelos%20son%20la%20mayor,es%20retornado%20a%20la%20atm%C3%B3sfera).
- Chávez, R. (s/f). *MODELO DE RIESGO DE EROSION DE SUELO EN CUATRO MICRO-CUENCAS DE LA CORDILLERA LOS MARIBIOS, NICARAGUA*. Investigación, Universidad de Yale, Escuela Forestal y Estudios Ambientales, New Heaven.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Gonzáles, J., Cantero Gutiérrez, A., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión Hídrica Principios y Técnicas de Manejo* (Primera ed.). Río Cuarto, Argentina: UniRío. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Jos-Cisneros/publication/261950035\\_Erosion\\_Hidrica\\_Principios\\_y\\_Tecnicas\\_de\\_Manejo/link/s0deec5360142db3b03000000/Erosion-Hidrica-Principios-y-Tecnicas-de-Manejo.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jos-Cisneros/publication/261950035_Erosion_Hidrica_Principios_y_Tecnicas_de_Manejo/link/s0deec5360142db3b03000000/Erosion-Hidrica-Principios-y-Tecnicas-de-Manejo.pdf)
- COLPOS. (1977). *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. Chapingo, Estado de México, México: SARH. Recuperado el 14 de Septiembre de 2021
- COLPOS. (1979). *Manual de Conservación de Suelo y Agua del Colegio de Postgraduados*. Chapingo, Estado de México, México.
- CONAFOR. (2018). *Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales*. Zapopan, Jalisco, México. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Llanos Del Berrendo (0228), Estado de Baja California*. México. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103427/DR\\_0228.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103427/DR_0228.pdf)
- CONAGUA. (2020). Estaciones Climatológicas 2020. México. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>

- Contreras Hinojosa, J. R., Volke Heller, V., Oropeza Mota, J. L., Rodríguez Franco, C., Martínez Saldaña, T., & Martínez Garza, Á. (Septiembre de 2003). Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. *TERRA Latinoamericana*, 21(3), 427-435. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311097001.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Tolima. (2007). *Cortolima.gov.co*. Obtenido de [https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro\\_documentos/pom\\_totare/diagnostico/m\\_212perdida\\_de\\_suelos\\_totare.pdf](https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf)
- Cortés Torres, H. G. (1991). *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de Maetría, Colegio de Postgraduados, Chapingo.
- Cotler, H. (2020). *Manual para evaluar la erosión de los suelos en zonas forestales*. (R. Landa, & D. Lugo, Edits.) Ciudad de México, México.
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana Pizaña, M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México. *Investigaciones Geograficas*(101). Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n101/2448-7279-igeo-101-e59976.pdf>
- DDESyMA. (25 de Agosto de 2017). *Euskadi*. Obtenido de Euskadi: <https://www.euskadi.eus/informacion/degradacion-del-suelo/web01-a2inglur/es/>
- De La Cruz Jasso, M., Hernández Téllez, M., Balderas Plata, M. Á., & Franco Plata, R. (2011). *EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DEGRADACIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO LERMA, ESTADO DE MÉXICO, UTILIZANDO PLATAFORMAS SIG'S*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía, Toluca. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenidos/eventos/2011/infogeo/ET6\\_52\\_DELACRUZ.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/eventos/2011/infogeo/ET6_52_DELACRUZ.pdf)
- Díaz Rodríguez, J. A. (29 de Agosto de 2005). LOS SUELOS LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2). Obtenido de <http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/SuelosLacustresDeMexico.pdf>
- Earth Observing System. (5 de Febrero de 2020). *eos.com*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/erosion-del-suelo/>
- Elnashar, A., Zeng, H., Wu, B., Fenta, A. A., Nabil, M., & Duerler, R. (12 de Junio de 2021). Soil erosion assessment in the Blue Nile Basin driven by a novel RUSLE-GEE framework. (P. Pereira, Ed.) *Science of the Total Environment*(793), 1-17.
- Encina Rojas, A., & Ibarra, J. (s/f). *La Degradacion del Suelo y sus Efectos en la Poblacion*. Dialnet.
- ESRI. (2019). *desktop.arcgis.com*. Obtenido de [https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm#ESRI\\_SECTION1\\_0ABED11B8FAB4FCFBB4E1E86C6975B67](https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm#ESRI_SECTION1_0ABED11B8FAB4FCFBB4E1E86C6975B67)
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia.

- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. (O. d. Ambiente, Ed.) Roma, Italia.
- FAO. (1986). *Ethiopian Highlands Reclamations Study*. Final Report, Food and Agriculture Organization, Roma.
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Roma, Italia. Obtenido de <https://www.fao.org/3/a0510s/a0510s.pdf>
- FAO. (11 de Mayo de 2015). *fao.org*. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
- FAO. (4 de Diciembre de 2015). *fao.org*. Obtenido de <https://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/357134/>
- FAO. (2015). *fao.org*. Obtenido de <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/key-messages/es/>
- FAO. (2015). *Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables*. Año internacional de suelos, Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i4405s/i4405s.pdf>
- FAO. (2015). *Suelos y Biodiversidad*. Año internacional de los suelos, Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i4551s/i4551s.pdf>
- FAO. (2019). Detengamos la erosión del suelo, salvemos nuestro futuro. *Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo*. Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1193735/>
- FAO. (2021). *FAO.org*. Obtenido de FAO.org: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- FAO. (2022). *fao.org*. Obtenido de <https://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- FAO. (2023). *fao.org*. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO. (s/f). *Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el*. Texcoco.
- Figueroa Sandoval, B., Cortés Torres, H. G., Pimentel López, J., Osuna Ceja, E. S., Rodríguez Olvera, J. M., & Morales Flores, F. J. (s/f). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica*. Manual, COLPOS, SARH.
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias - INTA, Instituto de Suelos – Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN). Buenos Aires: INTA.
- García Bermejo, J. T., Viguera Rodríguez, A., María Carrillo, J., Marco Cutillas, F., Espín Leal, P., & Castillo Elsitidí, L. (2009). Consideraciones sobre erosión hídrica y eólica en regiones semiáridas. Madrid, España. Obtenido de <http://www.caminosmurcia.es/pdf/Consideraciones%20sobre%20erosion%20hidrica%20y%20eolica%20en%20regiones%20semiaridas%20Juan%20Tomas%20Garcia%20Bermejo.pdf>
- García Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En M. d. Ambiente (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (págs. 309-334). España.

- Obtenido de  
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/48695/1/Interacciones%20entre%20la%20vegetaci%C3%B3n%20y%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADDRICA.pdf>
- García García, M. I. (2022). Los espacios verdes como elemento de sustentabilidad urbana. En COESPO, *Población y dinámicas urbanas* (págs. 53-67). Toluca, Estado de México, México.
- García Olmos, C. F., Riaño Melo, O., & Achury Arias, A. M. (1 de Enero de 2003). Modelo predictivo para cuantificar la erosión hídrica con base en experimentación en Sabrinski Municipio de Mosquera. *Colombia Forestal*, 8(16), 65-76.
- Gashaw, T., Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Addisu, S., Bantider, A., & Zeleke, G. (19 de Agosto de 2020). Evaluating potential impacts of land management practices on soil erosion in the Gilgel Abay watershed, upper Blue Nile basin. *Heliyon*. Obtenido de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405844020316200?token=6818AD639AA9A6FF78B22C9B5A55CD6FB6E77E427C0B158B6D2E742CE62556C2C6D157D6ECA146774151AD4E2BFFEBAB&originRegion=us-east-1&originCreation=20211108031353>
- Getnet, T., & Mulu, A. (Febrero de 2021). Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia. *Environmental Challenge*, 4.
- Gobierno del Estado de México. (2008). *Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México*. Tlalnepantla, Estado de México, México. Obtenido de [https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma\\_pdf\\_base\\_diag\\_ide\\_zon\\_sus.pdf](https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_base_diag_ide_zon_sus.pdf)
- González Mateos, R., Volke Heller, V., González Ríos, J., Ocampo Portillo, M., Ortíz Solorio, C., & Manzo Ramos, F. (2007). EFECTO DE LA EROSIÓN DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ DE TEMPORAL. *TERRA Latinoamericana*, 25(4), 399-408. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315558008.pdf>
- Guanche García, A. (2021). *Los Abonos Verdes*. AgroCabildo. Obtenido de [https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/agec\\_454\\_abonos\\_verdes.pdf](https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/agec_454_abonos_verdes.pdf)
- Gutiérrez del Valle, A. (2014). *Erosión Hídrica en el Estado de Tlaxcala*. Tesis de Maestría, COLPOS, Texcoco. Obtenido de [http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/2515/Guterrez\\_%20Vall\\_e\\_A\\_MC\\_Edafologia\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/2515/Guterrez_%20Vall_e_A_MC_Edafologia_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Hernández Martínez. (s/f). *Academia.edu*. Obtenido de [https://www.academia.edu/36034617/La\\_Erosi%C3%B3n\\_Conceptos\\_B%C3%A1sicos](https://www.academia.edu/36034617/La_Erosi%C3%B3n_Conceptos_B%C3%A1sicos)
- Hernández Téllez, M., García Aragón, J. A., Quentin, E., & Díaz Delgado, C. (2009). Identificación de áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma. *CIENCIA ergo sum*, 16(2), 181-188. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/38034/10411360009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Huerta Fernández, P., & Loli Figueroa, O. (23 de Febrero de 2014). EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO MOCHE. *Ecología Aplicada*, 13(1), 15-22.
- Hurni, H., Abate, S., Bantider, A., Debele, B., Ludi, E., Portner, B., . . . Zeleke, G. (2010). Land Degradation and Sustainable Land Management in the Highlands of Ethiopia. (H. Hurni, & U. Wiesmann, Edits.) *Global Change and Sustainable Development: A Synthesis of Regional Experiences from Research Partnerships*, 5, 187-207. Obtenido de [https://boris.unibe.ch/5959/1/Hurni\\_Land%20degradation.pdf](https://boris.unibe.ch/5959/1/Hurni_Land%20degradation.pdf)
- IAEA. (s/f). [www.iaea.org](http://www.iaea.org). Obtenido de <https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/tc/Agricul-Span.pdf>
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (s/f). *EL FACTOR C DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE)*. Universidad Politécnica de València, Producción Vegetal, València. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16568/AD%20C%20%20%20USLE.pdf?sequence=1#:~:text=El%20factor%20C%20de%20la%20USLE%20representa%20la%20efectividad%20de,la%20fuerza%20del%20flujo%20superficial.>
- Ibáñez, J. J. (2 de Octubre de 2008). El Perfil del Suelo. Madrid, España. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/10/02/102439>
- Ibáñez, J. J., & Manríquez Cosío, F. J. (23 de Noviembre de 2011). *Madrimasd.org*. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258#:~:text=Los%20Andosoles%20se%20caracterizan%20por,%E2%80%9Cvidrio%20volc%C3%A1nico%E2%80%9D%20en%20abundancia.>
- ICGC. (2019). *icgc.cat*. (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña) Obtenido de <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Suelos/Concepto-suelo>
- INECC. (2007). *El Suelo*. Obtenido de [inecc.gob.mx: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html)
- INECOL. (2021). *inecol.mx*. (Gobierno de México) Obtenido de <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/1175-el-contenido-de-agua-en-el-suelo-su-importancia#:~:text=La%20fuerza%20de%20atracci%C3%B3n%20de,y%20del%20ecosistema%20en%20general.>
- INEGI. (1983). Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Ciudad de México. México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825674595>
- INEGI. (1992). *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo*. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220945/702825220945\\_3.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220945/702825220945_3.pdf)
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional Ciudad de México. México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568597>

- INEGI. (14 de Julio de 2014). BOLETÍN DE PRENSA NÚM. 295/14. (295). Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2014/especiales/especiales2014\\_07\\_1.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2014/especiales/especiales2014_07_1.pdf)
- INEGI. (2019). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala . México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463833413>
- INIA. (2015). Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas., (págs. 6-8). Tacuarembó. Obtenido de <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/EI%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
- Kinnell, P. I. (2017). *Determining soil erodibilities for the USLE-MM rainfall erosion model*. University of Canberra, Faculty of Science and Technology. Elsevier.
- Kinnell, P., & Risse, M. (Diciembre de 1998). USLE-M: Empirical Modeting Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6), 1667-1673.
- Kirkby, M. J., & Morgan, R. P. (1984). *Erosión de Suelos* (Primera ed.). México, DF, México: Limusa.
- Lal, R., & Sewart, B. A. (1990). *Avances en la ciencia del suelo* (Primera ed., Vol. 11). Nueva York, USA: Springer.
- López Bermúdez, F., & Romero Díaz, A. (1998). EROSIÓN Y DESERTIFICACIÓN: IMPLICACIONES AMBIENTALES Y ESTRATEGIAS DE INVESTIGACIÓN. *Papeles de Geografía*(28), 77-89. Obtenido de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/45421/43461>
- López Ulloa, R. M. (2016). Servicios Ecosistémicos del Suelo. *Revista Científica Ecuatoriana*, 10-12. Recuperado el 23 de Octubre de 2021
- Loredo Osti, C., Béltran López, S., Moreno Sánchez, F., & Casiano Domínguez, M. (2007). *RIESGO A LA EROSIÓN HÍDRICA Y PROYECCIÓN DE ACCIONES DE MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO EN 32 MICROCUENCAS DE SAN LUIS POTOSÍ* (Primera ed.). San Luis Potosí, México. Obtenido de <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre31.pdf>
- Maldonado, Y. (1 de Enero de 2018). *geologiaweb.com*. Obtenido de <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/composicion-suelo/>
- Maldonado, Y. (2021). Obtenido de geologiaweb.com: <https://geologiaweb.com/rocas/andesita/>
- Mármol, L. A. (2008). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas y corrección de torrentes* (Primera ed.). Argentina.
- Martínez Ménez , M. (Octubre de 1983). Técnicas sobre la Conservacion y Productividad de los Suelos en México. *Terra*(1), 24-31.
- Matadamas Ortiz, J. E. (2004). Conservacion del Suelo y Agua. México. Obtenido de <https://docplayer.es/83783073-Elaboro-jaime-e-matadamas-ortiz-agronomia-prepa-agric-uach.html>

- Méndez, W., González, Z., Suárez, J., Arauno, M., & Vielma, M. (Abril de 2016). Geomorfología de los abanicos aluviales del piedemonte norte del macizo El Ávila, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40(87). Obtenido de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1010-29142016000100006](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142016000100006)
- Moncada de la Fuente, J., Anaya Garduño, M., Ortiz Solorio, C., Sánchez García, P., & Chacón Rodríguez, J. (2013). Protejamos el suelo que nos da vida. *Suelo*.
- Montes de León, M. A., Domínguez Cortazar, M. A., & Ventura Ramos, E. (s/f). *METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS UTILIZANDO UN SIG*. Universidad Autónoma de Queretaro, Facultad de Ingeniería-División del Posgrado, Queretaro.
- Morales Flores, F., & Martínez Menez, M. (s/f). *Rotación de Cultivos*. Ficha informativa, COLPOS, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural, Texcoco.
- Morgan, R. P. (2005). *Soil Erosion & Conservation* (Tercera ed.). Oxford, Reino Unido: Blackwell.
- National Soil Erosion Research: West Lafayette, IN. (8 de Diciembre de 2016). *USDA Agriculture Research Service*. Obtenido de USDA: <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/usle-database/usle-history/>
- ONU. (5 de Diciembre de 2018). <https://www.unep.org/>. Obtenido de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/es-el-suelo-tan-importante#:~:text=El%20suelo%20es%20el%20fundamento,las%20personas%20y%20los%20animales>.
- ONU. (2022). [mexico.un.org](https://mexico.un.org). Obtenido de <https://mexico.un.org/es/sdgs>
- Ortiz Solorio, C. A., & Cuanalo de la Cerda, H. E. (1984). *Metodología del levantamiento fisiográfico: un sistema de clasificación de tierras* (Segunda ed.). (C. d. Postgraduados, Ed.) Texcoco, Estado de México, México.
- Pando Moreno, M., Gutiérrez Gutiérrez, M., Maldonado Hernández, A., Palacio Prieto, J. L., & Estrada Castellón, E. (25 de Junio de 2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*(51), 23-36.
- PAOT. (2003). *Informe Anual 2003*. Ciudad de México, México. Obtenido de <https://paot.org.mx/centro/paot/informe2003/temas/suelo.pdf>
- Pedraza Villafaña, A. (2015). *Estimación de la erosión hídrica mediante dos métodos de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) en la cuenca del río Chapingo, Texcoco*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional, Toluca.
- Pennok, D. (2019). *SOIL EROSION; the greatest challenge for sustainable soil management*. (E. M. Silva Tinajero, Trad.) Roma. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>
- Pérez Nieto, S., Arellano Monterrosas, J. L., Ibáñez Castillo, L. A., & Hernández Saucedo, F. R. (2012). Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 30(2). Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792012000200103&script=sci\\_arttext#aff1](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792012000200103&script=sci_arttext#aff1)

- Pimentel, D., & Kounang, N. (1998). *Ecology of Soil Erosion in Ecosystems*. Artículo científico, Cornell University, College of Agriculture and Life Sciences, Nueva York.
- Piscitelli, M. (15 de Julio de 2015). *unicen.edu.ar*. Obtenido de unicen.edu.ar: <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>
- Pla Sentís, I. (13 de Diciembre de 2011). Evaluación y modelización hidrológica para el diagnóstico de “desastres naturales”. *Revista Universidad Autónoma de Lérida*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/29730/39286>
- Porta, J., López Acevedo, M., & Poch, R. M. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos* (Tercera ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa. Obtenido de <https://books.google.com.mx/books?id=7x1fAwAAQBAJ&pg=PA22&lpg=PA22&dq=Los+suelos+constituyen+una+cubierta+delgada+en+la+superficie+terrestre,+de+unos+pocos+cent%C3%ADmetros+a+varios+metros.+Como+cuerpo+natural,+el+suelo+constituye+una+interfase+que+permit>
- Reyes Avilés, I. (2014). *Estimación del balance de sedimentos a través de un SIG*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca.
- Rivera Toral, F., Pérez Nieto, S., Ibañez Castillo, A., & Hernández Saucedo, R. (Enero de 2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46(2). Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000200001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000200001&script=sci_arttext)
- Rostango, C., Del Valle, H., & Buschiazzi, D. (2004). La Erosión Eólica. Buenos Aires. Obtenido de <http://200.9.244.24/pdf/LaErosionEolica.pdf>
- SAGARPA, & COLPOS. (s/f). *Abonos Verdes*. Ficha, SAGARPA, Subsecretaría de Desarrollo Rural Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/171259310/Abonos-Verdes-SAGARPA-pdf>
- SAGARPA, & COLPOS. (s/f). *Labranza de conservación*. SAGARPA.
- Sánchez, G. C. (Octubre de 2013). <https://www.odepa.gob.cl/>. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl/content/uploads/2013/10/SueloAgricultura201310.pdf>
- Santa Cruz De León, G. (Marzo de 2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo. *Aqua*, 3(1), 45-54.
- Santiago Alverio, I., & Rodríguez, M. (2014). *Erosión y Aumento en Inundabilidad en el Municipio de Río Grande*. Universidad Politécnica de Puerto Rico, Departamento de Ciencias Geomáticas, San Juan. Obtenido de [http://prcrepository.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.12475/776/Art%20Final\\_Itzel%20Santiago.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://prcrepository.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.12475/776/Art%20Final_Itzel%20Santiago.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sanz, J. M., Bustamante, I., Goy, J. L., Graña, A. M., Barrera, I., Gonzáles Hernández, F. M., & Forteza, J. (2008). Erosión actual y potencial en el Paisaje Protegido de El Rebollar (Sierra de Gata – Salamanca) . *Geo Temas*(10). Obtenido de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/60843/1/Sanz,%20J.%20M.%20Erosi%C3%B3n%20actual%20y%20potencial%20en%20el%20paisaje.....pdf>





- Valdivia Martínez, O., Peña Uribe, G. d., Rufino Rodríguez, F., Torres Gonzáles, J. A., & Meraz Jiménez, A. d. (3 de Febrero de 2023). Ajuste de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en parcelas de escurrimiento ubicadas en una región del centro de México. *Terra Latinoamericana*, 40. Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792022000100142&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792022000100142&script=sci_arttext)
- Vargas Lomelín, J. G. (2015). *Estimación de la Erosión Hídrica Actual y Potencial de la Sub-cuenca de Sayula, Jalisco, México*. Tesis, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias División de Ciencias Biológicas y Ambientales, Zapopan. Obtenido de [http://biblioteca.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5992/Vargas\\_Lomelin\\_Jose\\_Guillermo.pdf?sequence=1](http://biblioteca.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5992/Vargas_Lomelin_Jose_Guillermo.pdf?sequence=1)
- Vásquez, A., & Tapia, M. (Diciembre de 2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *INGENIERÍA UC*, 18(3), 42-50. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/707/70723269005.pdf>
- Vega Carreño, M. B., & Febles Gonzáles, J. M. (Abril de 2005). Redalyc.org. *Minería y Geología*, 21(2), 4-7. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223516049002.pdf>
- Vergara Sánchez, M. A. (Octubre de s/f). *Degradación y Fertilidad de Suelos*. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de suelos, Chapingo.
- Vivas Enríquez, I. E., Arceo Arceo, J. M., García Pineda, M., Hernández Jaen, L., Miranda Velázquez, I., & Ramos Rodríguez, A. (2014). *Apuntes de Agronomía 1*. Apunte, Universidad Autónoma de Chapingo, Área de agronomía, Chapingo. Obtenido de <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-chapingo/agronomia/apuntes-de-agronomia-1-unidad-1-programa-de-agronomia/17260281>