



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

EROSIÓN HÍDRICA EN EL ESTADO DE TLAXCALA

ANGÉLICA GUTIÉRREZ DEL VALLE

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

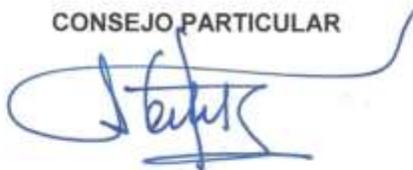
2014

La presente tesis, titulada: **Erosión hídrica en el estado de Tlaxcala**, realizada por la alumna: **Angélica Gutiérrez Del Valle**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR



CONSEJERO:

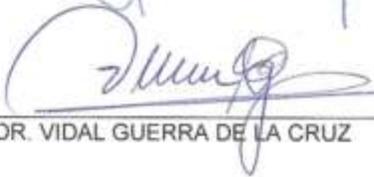
DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESORA:



DRA. MA. DEL CARMEN GUTIERREZ CASTORENA

ASESOR:



DR. VIDAL GUERRA DE LA CRUZ

ASESOR:



MC. PATRICIO SÁNCHEZ GUZMAN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre 2014

AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios por sus promesas cumplidas y porque cada día cuida mi entrada y salida (Salmos 121:8).

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

A CONACYT, por la beca otorgada para mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena y MC. Patricio Sánchez por su paciencia y aportaciones al presente trabajo.

Al Dr. David H. Noriega Cantú, Dr. Ricardo González Mateos, MC. Rubén Cruzaley Sarabia, Dr. Alejandro P. Ceballos Silva, Dr. Vidal Guerra de la Cruz y Alberto Leyva Mayo. Por su impulso, guía y motivación en mi crecimiento laboral, profesional y personal.

Ing. Julián Pérez, por su amistad y apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros del CP: Verónica, MC. Patricio, Connie, Rogelio, Gris, Rosario, Olga por esos momentos de convivencia y risa que permitían renovar fuerzas para seguir adelante. A mis amigos Palmira, Ángel, Mary, Diana, David, Mine y Rosita, por alentarme en los momentos en que las fuerzas parecían agotarse.

Al personal del Laboratorio de Génesis Juanito, Pedro, Mario, Arturo, quienes durante el trabajo compartieron un clima de compañerismo y solidaridad durante las agotadoras jornadas.

DEDICATORIA

Con cariño especial a mis padres Isaí y Marcela quienes con su infinito amor nos guían, corrigen, exhortan, pero sobretodo nos impulsan y motivan para que cada uno de sus hijos alcancemos nuestras metas. A mis hermanos Enóc e Isaí por su apoyo incondicional. A mí cuñada Nancy y mi hermosa sobrina Jatziry por todas las alegrías que nos das. A mí otro sobrino que sin conocerlo, lo esperamos con ansia y amor. LOS AMO Y DOY GRACIAS DIOS POR LA FAMILIA QUE ME DIO.

A mi tío Eliud Gutiérrez Zagoya[†] por tus consejos de vida y por tu ejemplo de bondad y servicio.

A mi abuelita Esthercita con tus 103 años me recibes con una sonrisa llena de amor.

A mi gran Familia Gutiérrez Zagoya, a mis tíos, primos, sobrinos por su cariño.

A la Familia Díaz Leal por todas sus muestras de afecto y amor. Gracias por adoptarme como nieta, hija y hermanita.

A Fer gracias por todos esos momentos de alegrías, tristezas, llantos, triunfos y derrotas pero sobre todo gracias por tu apoyo incondicional.

Resumen

EROSIÓN HÍDRICA EN EL ESTADO DE TLAXCALA

Angélica Gutiérrez Del Valle, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Tlaxcala es uno de los estados con mayores porcentajes de degradación de suelos (76.8%), y la erosión hídrica es el principal proceso (SEMARNAT-CP, 2002). Sin embargo, los factores relacionados con este tipo de degradación no han sido estudiados. El objetivo del presente estudio fue reconocer en diferentes áreas del estado de Tlaxcala, los factores causales de la erosión hídrica. El método empleado consideró cuatro etapas: 1) Selección de municipios por superficie erosionada, uso de suelo y cobertura vegetal; 2) Elaboración de Levantamientos Fisiográficos a nivel municipal con el enfoque Paisajista; 3) Evaluación de los grados de erosión en campo con el Método de Morgan y; 4) Determinación de la textura y materia orgánica del suelo y la caracterización de tobas por su mineralogía. Se muestrearon 58 sitios en 7 municipios del Estado. Los resultados indican la ocurrencia de diferentes intensidades de pérdida de suelo: sin erosión, las áreas con cobertura vegetal mayor a 70%; erosión moderada en áreas agrícolas con suelos mayores a 50 cm de profundidad localizadas en la frontera forestal; erosión severa, cuando hay presencia de canalillos y afloramiento de tobas con o sin movimiento de material rocoso; y finalmente, erosión muy severa, en áreas donde existen cárcavas de gran magnitud cuyo efecto se presentó primeramente como una erosión edáfica y después como erosión geológica. Las conclusiones fueron que las características geomorfológicas condicionan el grado de severidad de la erosión hídrica del suelo y el tipo de toba presente determina la magnitud de la erosión hídrica geológica. Además, la erosión hídrica del suelo es el resultado de un cambio de uso de suelo forestal a agrícola, y la velocidad está asociado con factores como el material geológico y la topografía.

Palabras claves: Erosión hídrica edáfica, Sistemas Terrestres, Severidad de Erosión, Erosión hídrica geológica.

Abstract

EROSIÓN HÍDRICA EN EL ESTADO DE TLAXCALA

Angélica Gutiérrez Del Valle, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Tlaxcala is a state with the highest percentages of soil degradation (76.8%), and water erosion is one of the main processes caused by agricultural activities, overgrazing, urban growth and deforestation (SEMARNAT-CP, 2002). However, the factors associated with this type of degradation have not been studied. The objective of this study it was related to recognize the different types of water erosion in Tlaxcala. The methodology employed consists of four stages: 1) Municipalities selection; 2) Conducting Land System Surveys to level of Land Facets; 3) Field evaluation of soil water erosion degrees with the Morgan Method, and; 4) Soil analytical determinations (texture and organic matter) and tuffs characterization. A total of 58 sites were sampled, they were located sites with no erosion, they have over 70% of vegetation covering the soils. Moderate water erosion, not apparent with shallow soils depths of 50 cm. The evident severe water erosion shows rill formation as the main cause of soil losses, combined with the outcrops of tuffs with or without rock material movements. Finally, it is present the very severe water erosion with gullies on geological materials. This evaluation it was usefull to identify areas with different water erosion degrees and it represents an adequate tool to prevent erosive processes according to the existing soil and geological material.

Key words: Water erosion, Land System Survey, Erosion degrees.

CONTENIDO

Resumen.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 El Recurso Suelo	3
2.2 Erosión del Suelo	3
2.3 Proceso de Erosión	3
2.4 Formas de Erosión Hídrica	5
2.4.1 <i>Erosión por Salpicadura</i>	<i>5</i>
2.4.2 <i>Erosión Laminar.....</i>	<i>5</i>
2.4.3 <i>Erosión en Surcos o Canalillos.....</i>	<i>5</i>
2.4.4 <i>Erosión en Cárcavas.....</i>	<i>5</i>
2.5 Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica	6
2.5.1 <i>Clima.....</i>	<i>6</i>
2.5.2 <i>Relieve</i>	<i>7</i>
2.5.3 <i>Vegetación.....</i>	<i>8</i>
2.5.4 <i>Material Geológico.....</i>	<i>8</i>
2.6 Degradación del Suelo.....	9
2.7 Evaluación de la Erosión.....	9
2.7.1 <i>Métodos Cuantitativos</i>	<i>9</i>
2.7.2 <i>Métodos Cualitativos.....</i>	<i>10</i>
2.8 <i>Degradación de Suelos a Nivel Nacional</i>	<i>12</i>
2.9 <i>Degradación a Nivel Estatal.....</i>	<i>13</i>
3. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	16
3.1 <i>Objetivo General:.....</i>	<i>16</i>
3.2 <i>Objetivos Específicos:.....</i>	<i>16</i>
3.3 <i>Hipótesis</i>	<i>16</i>
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
4.1 <i>Ubicación Geográfica.....</i>	<i>17</i>

4.2	<i>Caracterización Geográfica</i>	18
4.2.1	<i>Relieve</i>	18
4.2.2	<i>Geología</i>	18
4.2.3	<i>Clima</i>	18
4.2.4	<i>Suelos</i>	19
4.2.5	<i>Vegetación</i>	19
4.3	<i>Selección de Municipios</i>	20
4.4	<i>Levantamientos Fisiográficos</i>	20
4.5	<i>Evaluación de la Erosión</i>	20
4.6	<i>Propiedades Químicas y Físicas de Suelos, Sedimentos y Tobas</i>	21
4.7	<i>Análisis mineralógico de Suelo, Sedimentos y Tobas</i>	21
4.8	<i>Análisis de Resultados</i>	21
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
5.1	<i>Selección de Municipios</i>	22
5.2	<i>Levantamientos Fisiográficos Municipales</i>	24
5.2.1	<i>Corrección de linderos de Sistemas Terrestres</i>	24
5.2.2	<i>Selección de Facetas</i>	24
5.2.3	<i>Evaluación en campo de los sitios de muestreo</i>	34
5.2.4	<i>Análisis mineralógico</i>	47
5.3	Modelo de la Dinámica de la Erosión Hídrica en Tlaxcala	49
6.	CONCLUSIONES	54
7.	LITERATURA CITADA	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Área de Estudio.	17
Figura 2. Mapa de Degradación del Suelo Causada por el Hombre en el Estado de Tlaxcala (SEMARNAT-CP, 2002).	22
Figura 3. Tipos de degradación dominante en siete municipios de Tlaxcala.	25
Figura 4. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Tlaxco.	26
Figura 5. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Calpulalpan. ...	27
Figura 6. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Terrenate.	28
Figura 7. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Tetla.	29
Figura 8. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Huamantla.	30
Figura 9. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Españaíta.	31
Figura 10. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Ixtacuixtla. ...	32
Figura 11. Distribución de los 58 Sitios muestreados en campo.	33
Figura 12. Paisajes de los Sitios Sin Erosión Hídrica.	35
Figura 13. Paisajes con Erosión Hídrica No Aparente.	37
Figura 14. Paisaje Representativo con Erosión en Canalillos.	38
Figura 15. Paisaje Representativo de áreas abandonadas con suelo mezclado con rocas, erosión hídrica causa desprendimiento de suelo y el arrastre de material rocoso.	40
Figura 16. Paisaje representativo de la toba presente.	41
Figura 17. Paisajes representativos con presencia de toba.	43
Figura 18. Paisaje representativo de las características visibles superficiales de las tobas.	44
Figura 19. Paisajes con erosión muy severa por formación de cárcavas muy profundas.	46
Figura 20. Diagrama esquemático de las clases de erosión hídrica observadas en el Estado de Tlaxcala.	49
Figura 21. Paisaje con áreas estables, áreas agrícolas y áreas con alto grado de erosión.	51

LISTA DE CUADROS

Cuadros 1. Extensión Superficial (%) de los Procesos de Degradación en siete Municipios del Estado de Tlaxcala.....	23
Cuadros 2. Indicadores de la erosión del suelo según Morgan (1997).....	34
Cuadros 3. Descripción de los Sitios Seleccionados Sin Erosión.	36
Cuadros 4. Descripción de los sitios seleccionados con erosión moderada.	37
Cuadros 5 Descripción de los sitios seleccionados con Erosión Severa.	39
Cuadros 6. Descripción de los sitios seleccionados erosión muy severa con desprendimiento.	40
Cuadros 7. Descripción de los sitios de las facetas seleccionadas.	42
Cuadros 8. Descripción de las tobas de los sitios seleccionados.	44
Cuadros 9. Características físicas y químicas de la toba.	45
Cuadros 10. Características físicas y químicas de las tobas.	47
Cuadros 11. Propiedades de las tobas.	48

1. INTRODUCCIÓN

La acción del clima, la topografía y los organismos vivos en diferentes periodos, actúan mediante procesos físicos, químicos y biológicos sobre la roca madre y dan origen al suelo. Sin embargo, éste se puede degradar mediante procesos naturales o inducidos por las actividades humanas, esa situación representa un severo riesgo ambiental al perder también su biodiversidad y potencial productivo.

La erosión hídrica constituye una forma de degradación, en donde las partículas en suspensión son arrastradas cuenca abajo y depositadas en ríos, lagos y represas y por lo tanto afectando su calidad o su capacidad de almacenamiento. Además, afecta las funciones del suelo, tales como: su capacidad para amortiguar y filtrar, su papel en los ciclos del agua y el nitrógeno, y su aptitud para suministrar y sustentar la diversidad biológica. Conjuntamente, repercute en la compactación, endurecimiento, acidificación y reducción en el contenido de materia orgánica.

Actualmente, este tipo de degradación se está incrementando por el crecimiento de la población que al demandar una mayor producción de alimentos presiona para el cambio de uso del suelo y grandes superficies son deforestadas.

Los estudios sobre erosión del suelo se han realizado bajo diversas escalas espaciales, desde niveles mundiales hasta los regionales y/o locales, proporcionando información de tipo cuantitativo o cualitativo. La caracterización de áreas con riesgo de erosión es útil para la gestión medioambiental, así como para la planificación de medidas contra la degradación del suelo. Por lo tanto, es importante cartografiar riesgos de erosión hídrica y los factores que influyen en ella, para buscar la relación existente entre ambos. Además con el conocimiento de la relación de los factores causales se puede determinar la severidad del riesgo de erosión.

En el caso del estado de Tlaxcala, la erosión hídrica representa un problema severo pues grandes extensiones se han perdido disminuyendo su potencial productivo, ya sea forestal o agrícola. En ese sentido, el reconocimiento de los

tipos y grados de erosión pueden ayudar a localizar y definir su naturaleza, así como establecer una secuencia de la erosión para predecir los efectos regionales por el cambio de uso de suelo. En consecuencia, el desarrollo de investigaciones para evaluar la severidad de la erosión permitirá tomar medidas de prevención y/o conservación.

El presente trabajo, tiene como objetivo el reconocer las diferentes formas de la erosión hídrica en Tlaxcala y los factores causativos de la erosión hídrica y su dinámica a nivel de faceta terrestre.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Recurso Suelo

Los suelos constituyen un sistema vital, debido a que cumplen importantes funciones para la vida humana, y su uso inadecuado puede generar significativos impactos ambientales (López, 2002). En la actualidad, los cambios y las alteraciones que están afectando es la degradación de suelos, dentro del cual se encuentra la erosión hídrica.

2.2 Erosión del Suelo

La erosión es un proceso natural o acelerado por el hombre que conlleva la pérdida de suelo de un determinado lugar y que afecta a todos los terrenos que se encuentran expuestos a la acción de la lluvia o el viento (Alcañiz, 2008). Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo controlan en gran parte la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión (Zink *et al.*, 2001). No obstante la deforestación puede acelerar los procesos. Además, es un importante problema ambiental en todo el mundo, pues al eliminar la fracción arcillosa y sus nutrientes por lo que reduce su fertilidad (Heshmati *et al.*, 2013).

Los suelos pueden presentar diferentes susceptibilidades a la erosión, desde laminar, la incisión de cárcavas y movimientos en masa, los cuales están en función de las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje (Zinck, 2005). Dada la relevancia que tiene en la reducción de tierras disponibles para la actividad humana, la erosión constituye un serio problema, sobre todo en áreas donde el clima, el material parental, los tipos de suelos, el relieve y los usos del suelo favorecen los procesos de erosión.

2.3 Proceso de Erosión

La erosión se describe como el desplazamiento del material del suelo que tiene como agente causativo al agua o al viento (SEMARNAT-CP, 2002). Esta se genera por procesos naturales controlado por la pendiente, la vegetación, el

material presente en suelo, material geológico y también por actividades antrópicas (García, 2004). La erosión consiste en dos fases: primero desprendimiento de partículas y después transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y viento (Morgan, 1995); sin embargo, si la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase que es la deposición del material (Morgan, 1995; López y Romero, 1998). A continuación se describen las tres fases:

2.3.1 Desprendimiento

Es la disgregación de las partículas por salpicadura como resultado del golpeteo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo desnudo o por el desprendimiento de material geológico o bien por la rotura de los agregados del suelo. Este desprendimiento se produce por la acción del agua y el viento (Morgan, 1995; García, 2004).

2.3.2 Transporte

Es el proceso mediante el cual las partículas desprendidas del suelo son transportadas por agentes como agua, viento o gravedad y depositadas en diferentes lugares. Los agentes actúan superficialmente y contribuyen a remover el suelo en forma de salpicadura o flujo superficial y otro a través de pequeños canales conocidos como canalillos que pueden desaparecer por meteorización y laboreo, o permanecer como facciones de mayor duración en forma de cárcavas y barrancos.

2.3.3 Sedimentación

La sedimentación de las partículas se presenta cuando la energía de los agentes de transporte no es suficiente para seguir transportándola o cuando estas son retenidas en las irregularidades del terreno o por la vegetación. Las partículas más finas de suelo (sedimento), viajan en forma suspendida en el flujo hídrico y en conjunto también remueven los nutrientes del suelo (Adema *et al.*, 2001).

2.4 Formas de Erosión Hídrica

2.4.1 Erosión por Salpicadura

Consiste en el arranque y desplazamiento de partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia (Alcañiz, 2008). La acción depende de la energía cinética con que impactan las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y se presenta en función de la intensidad y cantidad de lluvia; en consecuencia, ésta se convierte en una agente de consolidación y de dispersión.

2.4.2 Erosión Laminar

La duración, intensidad y frecuencia de las precipitaciones logran la remoción de capas delgadas y uniformes de suelo sobre toda el área, produciendo lo que se denomina erosión laminar.

2.4.3 Erosión en Surcos o Canalillos

Cairns *et al.* (2001) mencionan que los surcos o canalillos son el resultado de la remoción del suelo por la acción de la escorrentía. Estos se forman pendiente abajo, donde el flujo de escorrentía comienza a canalizarse (Morgan, 1995) y se originan por el socavamiento repetido del terreno, como consecuencia de un flujo de agua concentrado (Poesen *et al.*, 2003).

2.4.4 Erosión en Cárcavas

La erosión en cárcavas es uno de los procesos más severos ya que modifican el paisaje y generan un gran movimiento de sedimentos a los cuerpos de agua. La cárcava es una depresión profunda, canal o barranco en un paisaje y se forman mediante un proceso gobernado por las características del flujo superficial con frecuencia asociado con un incremento de la escorrentía (Gómez *et al.*, 2011). La escorrentía se canaliza en zanjas que profundizan con el tiempo y la principal causa de su formación son las pendientes pronunciadas, reducción de la cubierta vegetal y el sobrepastoreo (Stocking y Murnaghan, 2003).

Con base a lo anterior, la erosión hídrica es la principal causa de pérdida de suelo y el medio principal de redistribución de las partículas (Bertoni y Lombardi Neto, 1990). El estudio integrado del ciclo de erosión, desprendimiento, transporte y acumulación de sedimentos en el paisaje facilita la comprensión de la dinámica erosiva, en la que la importancia relativa de cada parámetro y las relaciones entre las características fisiográficas se ponen de manifiesto (Vega, 2006).

La erosión de los suelos y la depositación de sedimentos asociados son procesos naturales, pueden ser acelerados por la intervención humana a través de la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas de cultivos (Zapata, 2003; McLauchlan, 2006).

2.5 Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica

Los factores que determinan la erosión son: lluvia, viento, suelo, pendiente, y cobertura vegetal. Estos y otros factores relacionados se pueden considerar bajo tres aspectos: energía, resistencia y protección. Los factores de formación intervienen de la siguiente manera:

2.5.1 Clima

El clima es el factor principal que regula la velocidad y el tipo de formación del suelo, y es el agente que determina la distribución de la vegetación y los tipos de procesos geomorfológicos. La temperatura y la precipitación son las variables más importantes y son las responsables directas del tipo de propiedades físicas y químicas del suelo (FitzPatrick, 1980). Ahora bien, con la disponibilidad y el flujo de agua regulan la velocidad de desarrollo de la mayoría de los procesos edáficos. Es por ello que la intensidad de percolación (infiltración) se considera un factor decisivo en la formación del suelo (condicionada por factores climáticos, cantidad y distribución anual de las precipitaciones, y algunos parámetros edáficos, como la permeabilidad). La intensidad de percolación indica si en un suelo se tiene exceso de agua como para producir el lavado y la translocación de materiales o

por el contrario, si el agua queda retenida sin que se desplace hacia los horizontes profundos.

También se presentan relaciones entre el clima y las propiedades del suelo, las cuales establecen una tendencia entre el pH y la precipitación y entre la temperatura y el porcentaje de arcilla formada, que depende a su vez del tipo de roca (Ortiz *et al.*, 2011). Sin embargo, la variable climática más importante es la lluvia, debido a su fuerte influencia en ciertos procesos de la erosión hídrica (Morgan, 2005). Las principales causas erosivas están relacionadas con la cantidad e intensidad de la lluvia (García-Chevesich, 2008).

2.5.2 *Relieve*

El relieve está constituido por rasgos superficiales del planeta con una gran complejidad geométrica y topográfica. La forma del terreno se puede describir con base a la pendiente como: meseta, cantil, talud, planicie, cause y depresión (Ortiz, 2005). El análisis del paisaje, desde este punto de vista, permite la evaluación y modelización de distintos procesos naturales. Las geoformas y los suelos comparten los mismos factores de formación, que genera relaciones complejas de causa y efecto. El relieve interactúa con otros factores formadores como es el clima y la biota, determinando diferentes paisajes y diferentes unidades de suelo (Jenny, 1994). A su vez, está influenciado por agentes de deformación como es el intemperismo y la erosión, por lo que repercuten en la diversidad de suelos de una región (Cajuste y Gutiérrez, 2011). El conocimiento profundo de las características topográficas del medio constituye un punto de partida para el estudio de los suelos debido a su influencia sobre la sedimentación y arrastre de partículas, nutrientes y el movimiento del agua superficial.

La susceptibilidad de un suelo a la erosión es dada por una combinación de factores tales como: la topografía de un paisaje, la precipitación, el viento, así como la exposición del terreno (Pimentel, 2006; Wysocki *et al.*, 2009; MacMillan y Shary, 2009). La pendiente provoca la aceleración o desaceleración del flujo y la concavidad o convexidad de la superficie favorece la concentración o dispersión

del mismo. Los estudios geomorfológicos comprueban que la erosión es un proceso natural, pero que la distribución de su intensidad, en el tiempo y espacio, es el resultado de la interacción de circunstancias físicas y químicas. La erosión del suelo es, por lo tanto, una parte integrante de ambos entornos: natural y cultural (Morgan, 1997).

2.5.3 Vegetación

La vegetación actúa como cubierta protectora entre el suelo y la atmósfera. La presencia de una cobertura vegetal no sólo protege el suelo contra la erosión de impacto, sino también brinda rugosidad al terreno por donde el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad y, por ende, su poder erosivo (Morgan, 2005). Las copas de los árboles interceptan la lluvia, y reducen la energía cinética de las gotas de agua (García-Chevesich, 2008).

2.5.4 Material Geológico

El material geológico determina las propiedades del suelo, principalmente la textura (Erlich *et al.* 1955; Miles y Franzmeier 1981; Ochoa *et al.*, 1994). La distribución del tamaño de partícula controla a la infiltración, más rápida en suelos con textura arenosa y más lenta en suelos de textura fina por las fuerzas de cohesión y adhesión. Además, la textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad, pues no todas las clases texturales se erosionan con la misma facilidad.

Otros autores indican que la erosibilidad de un suelo en particular está en función también de otras propiedades como: contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Morgan, 2005; Schaetzl y Anderson, 2005). La materia orgánica puede mejorar casi todas las propiedades del suelo, pues la presencia de ésta aumenta la aireación e infiltración, así como la cohesividad, de ahí la resistencia a la erosión (García-Chevesich, 2008).

2.6 Degradación del Suelo

La FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) define a la degradación del suelo como el “proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir cuantitativa y cualitativamente bienes o servicios”. A escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de suelos inducida por las intervenciones humanas, la cual afecta aproximadamente 11 millones de km²; es decir, 8.5% de los 130 millones de km² de tierras que posee la superficie del globo terráqueo.

En conjunto, las superficies afectadas por diversos procesos degradativos son las siguientes: erosión hídrica 10.94 millones de km²; erosión eólica 5.49 millones de km²; degradación química 2.39 millones de km² y degradación física 0.83 millones de km², con diferentes intensidades (Oldeman, 1994).

2.7 Evaluación de la Erosión

En la actualidad, existe gran diversidad de métodos para determinar la erosión, los cuales difieren en cuanto a escala espacial y propósito (Ortiz *et al.*, 2011; Warren, 2002). Para su descripción se han agrupado en métodos cualitativos y cuantitativos, de acuerdo con el tipo de evaluación y resultado.

2.7.1 Métodos Cuantitativos

Los métodos cuantitativos estiman las pérdidas de suelo por erosión mediante evaluaciones directas o indirectas. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (en inglés, United States Department of Agriculture, USDA), propuso la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation, USLE), con el objetivo de determinar la pérdida media anual de suelos (Wischmeier *et al.*, 1958). La principal limitante es la extrapolación de la información a escalas mayores y que no proveen información sobre la distribución espacial del suelo necesaria para las decisiones de manejo.

Renard *et al.* (1991) realizaron una serie de cambios para evaluar la erosión laminar y en canalillos, las cuales se incorporaron en la Ecuación Revisada de Pérdida de Suelo (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE). Los modelos de simulación están diseñados para estimar las tasas de erosión que ocurrirán con un determinado uso y manejo de suelo. Los cálculos para evaluar los factores son muy complejos, debido a que se necesitan muchos datos de lluvia que normalmente no están disponibles. Existen numerosas opciones alternativas, mucho más fáciles de operar con datos más asequibles, pero con peores resultados, aunque normalmente con suficiente precisión.

2.7.2 Métodos Cualitativos

Dentro de los métodos cualitativos está el propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en el cual se manifestó la necesidad de evaluar a nivel global la degradación de los suelos. Este programa, a través del ISRIC (1987-1990), presentó el mapa Mundial de la Degradación de los Suelos Inducida por el Hombre (GLASSOD, por sus siglas en inglés Global Assessment of Soil, Degradation, Evaluación Global de la Degradación del suelo), a una escala 1:10'000 000. Las unidades de los mapas de GLASOD cuentan con una serie de atributos como son la clase de degradación del suelo, grado, frecuencia de ocurrencia y los factores causantes de la misma. Además, con la finalidad de medir el fenómeno de la erosión en sus diversos grados, la FAO clasificó y representó cartográficamente en un mapa escala cuatro grados de erosión: ligero, moderado, severa y muy severa, a través del reconocimiento aéreo de grandes áreas. El principal usuario de dicha información fue Estados Unidos con el objetivo de apoyar a los programas gubernamentales para la conservación del suelo y gestión forestal (Castillo, 2005).

A partir de la publicación de GLASOD surgió la necesidad de evaluar la Degradación del Suelo a escala y nivel con más detalle. El estudio fue encargado por el PNUMA para ISRIC con estrecha cooperación con la FAO. En 1997 se obtuvo el estudio regional sobre la Degradación del Suelo Causada por el Hombre

en el Sur y Sureste de Asia, escala 1:5'000,000, conocida como ASSOD (Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation), dentro del cual se utilizó un mapa fisiográfico como marco de referencia geográfico (Van y Oldeman, 1997).

Los levantamientos fisiográficos son considerados prácticamente como una subdivisión del paisaje. El paisaje es definido como “un complejo de atributos superficiales o cercanos a la superficie terrestre, que son significativos para el uso de las tierras por el hombre” (Christian y Stewart, 1968). El enfoque del Paisaje o Paisajista, contempla las técnicas de interpretación de fotografías aéreas, ya que al utilizar el tono, la textura, los patrones y la imagen estereoscópica durante la fotointerpretación es una poderosa herramienta para la apreciación de las diferentes unidades terrestres y de otras características que son el resultado de controles geológicos subyacentes, del clima, de procesos geomorfológicos. etc.

Webster y Beckett (1970), propusieron como sistema de clasificación a las unidades: Sistema Terrestre, Faceta, Elemento y Variante. El sistema terrestre se define como un patrón recurrente de facetas, las cuales a su vez son una porción de la superficie terrestre, usualmente con una forma simple, sobre una misma roca o depósito superficial y con un suelo y un régimen de humedad que son uniformes o varían en una forma simple y consistente”. Cada Faceta es lo suficientemente homogénea para ser manejada uniformemente en la mayoría de los usos semi-intensivos de las tierras y son de un tamaño tal que pueden ser cartografiados sobre fotografías aéreas de escalas entre 1:10 000 y 1:80 000 (Young, 1974).

El Levantamiento Fisiográfico, aplicado en México, consideró solo dos tipos de unidades: Faceta y Sistema Terrestre, y utilizaron imágenes de satélite, una herramienta novedosa para su época (Ortiz y Estrada, 1975). Asimismo, este tipo de levantamientos relacionados con la conservación de suelos fueron realizados por León (1976) y Ortiz y Cuanalo (1977).

Morgan (1997), por su parte, propuso un procedimiento para levantamientos semidetallados de erosión, dentro del cual evalúa en campo los rasgos de erosión y los factores que influyen en ella tales como la geomorfología, relieve y uso de suelo. Dicho análisis permiten estimar la magnitud del proceso erosivo en términos cuantitativos, codificando en clases numéricas de erosión del 0 al 5; es decir, donde no presenta erosión hasta erosión muy severa.

2.8 Degradación de Suelos a Nivel Nacional

En México se han realizado dos evaluaciones de degradación del suelo; la primera, fue con el enfoque de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, USLE (Universal Soil Loss Equation), con el objeto de identificar riesgos de erosión y su magnitud, escala 1: 1 000 000 (SEMARNAT y UACH, 2003). El estudio consideró las siguientes cinco categorías: sin degradación aparente (0-5 ton/ha/año), Ligera (5-10 ton/ha/año), Moderada (10-50 ton/ha/año), Alta (50-200 ton/ha/año) y Muy Alta (>200 ton/ha/año). De acuerdo con los resultados, los estados que presentan un potencial de erosión hídrica Muy Severa son: Puebla (13.3%), Hidalgo y Chiapas (ambos con 10.6%), Distrito Federal (10.3%). La Erosión Severa la presentan: Guerrero (22.1%), Oaxaca (20.7%) y Chiapas (17.3%) principalmente. Dentro de la Erosión Moderada está: Tlaxcala (40.1%), Guerrero (37.4%) y Aguascalientes (37.1%).

El segundo enfoque se realizó en 2002, a través de la Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre, escala 1: 250 000, aplicando la metodología ASSOD (por sus siglas en inglés Assessment of Soil Degradation, Evaluación de la Degradación del Suelo), que es una modificación de la denominada GLASOD. Esa metodología fue adoptada por la SEMANART y aplicada por el Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP, 2001-2002). Dicho estudio reconoce dos grandes categorías de procesos de degradación del suelo: la degradación por desplazamiento del material del suelo, a través de la erosión hídrica y eólica que tienen como agentes causativos al agua y el viento. Además

de la degradación resultante de su deterioro interno, que considera en la actualidad a los procesos de degradación física y química.

A nivel nacional se realizó una evaluación sobre los procesos de degradación del suelo, usando como mapa base a un levantamiento fisiográfico elaborado con el enfoque de sistemas terrestres. En este proyecto se generó información directamente de campo sobre la erosión hídrica y eólica, así como de procesos físicos y químicos. El 45.1% del total del territorio mostró que los suelos estaban degradados por acciones antrópicas, y los principales procesos degradativos fueron: químico (18.3%), erosión hídrica (11.4%), erosión eólica (9.4%) y, en menor proporción, la degradación física (5.9%) (SEMARNAP-CP, 2002). Si además, se considera a los terrenos sin uso, que muchos de ellos están abandonados por su gran deterioro, estos valores se incrementan hasta 25.9% y por lo que en suma se tendría que 71% del territorio presenta problemas.

2.9 Degradación a Nivel Estatal

En Tlaxcala se han realizado diversos estudios sobre la erosión hídrica. Los enfoques más frecuentes corresponden a los trabajos realizados por Zarate y Anaya (1992), quienes efectuaron la delimitación de unidades fisiográficas y posteriormente evaluaron el riesgo de la erosión hídrica basada en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Otro enfoque cuantitativo de la erosión hídrica fue conducido por Alvarado *et al.* (2007), quienes se basaron en los modelos empíricos del Índice de erosión y Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, mediante una clasificación supervisada de imágenes de satélite y fotointerpretación de fotografías aéreas. Por su parte, Buendía-Rodríguez *et al.* (2007) y Guerra y Buendía (2010) identificaron la magnitud y distribución de diferentes grados de erosión y Espinosa (1992) empleó al levantamiento fisiográfico mediante la fotointerpretación de imágenes de satélite para evaluar la erosión hídrica en sistemas terrestres, y fotografías aéreas para definir y ubicar facetas terrestres para analizar el avance de erosión.

El estudio llevado a cabo por Colegio de Postgraduados (SEMARNAP-CP, 2002), determinó que Tlaxcala era uno de los estados que presentan las mayores degradaciones de suelos y que en conjunto con las tierras sin uso, constituyen el 76.8% del total de su territorio. Los procesos dominantes de la degradación causada por el hombre son la erosión eólica (25.57%), degradación química (23.5%), erosión hídrica (18.27%) y la degradación física (5.56%) (Figura 1). La erosión hídrica presenta dos tipos de degradación las cuales corresponden a la pérdida del suelo superficial a través de la erosión laminar (12.79%) y la erosión con deformación del terreno con presencia de cárcavas, de canales o movimientos de masas (5.48%). Los principales factores causativos son las actividades agrícolas en 76.5% de los terrenos degradados, el sobrepastoreo (13.77%), el crecimiento urbano (5.2%) y la deforestación (3.16%).

Con base en esta información se puede indicar que en Tlaxcala, la erosión hídrica constituye un serio problema que debe enfrentarse con las herramientas de conocimiento adecuadas, dada a la complejidad de las interacciones. Además, su ubicación en la franja del eje neovolcánico el cual está constituido por diversos materiales geológicos desde rocas, tobas y depósitos de cenizas volcánicas, genera una gran complejidad de paisajes fisiográficos, un clima interanual marcado e importantes áreas con cobertura forestal. El impacto de esta degradación del suelo constituye un problema ambiental, que conlleva a un impacto económico y social, relacionados con la pérdida de la productividad.,

Cabe señalar que no hay estudios cartográficos que aborden temas de la erosión hídrica y su relación con el material geológico, por lo que es importante abordar la presente investigación desde una perspectiva de análisis de la interacción de los factores que intervienen en los procesos de erosión y su relación con el material geológico con el que se encuentra asociados y reconocer si se trata de una erosión edáfica o una erosión geológica. Con este nuevo enfoque se puede caracterizar los tipos y severidad de la erosión presentes, así como su distribución espacial y obtener un modelo de cómo se origina la erosión

dependiendo del tipo del material parental. Asimismo, en función de la información generada se puedan proponer y ejecutar medidas para su control y focalizar los recursos económicos y las actividades para combatir el deterioro de suelos.

Finalmente, es importante indicar que la mayoría de los trabajos desarrollados, no sólo en Tlaxcala sino en diferentes estados del país, están más relacionados con la cuantificación de la erosión hídrica del suelo, que con explicación de la evolución secuencial del proceso degradativo.

3. OBJETIVOS E HIPOTESIS

3.1 Objetivo General:

Reconocer en diferentes áreas del estado de Tlaxcala, los factores causales de la erosión hídrica.

3.2 Objetivos Específicos:

- 1) Realizar levantamientos fisiográficos a nivel de faceta terrestre, para municipios con diferentes grados de erosión hídrica.
- 2) Evaluar la relación entre áreas erosionadas y los factores de formación del suelo (material parental, clima, relieve y vegetación).
- 3) Determinar las propiedades mineralógicas de las áreas erosionadas.

3.3 Hipótesis

- 1) El grado o la intensidad de la erosión hídrica es diferente en cada uno de los materiales parentales presentes en el estado de Tlaxcala.
- 2) El relieve es un factor de riesgo de erosión hídrica; sin embargo, el material parental determina su magnitud e intensidad.
- 3) La vegetación, el cambio y tipos de uso de suelo, aceleran la velocidad de la erosión hídrica.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación Geográfica

El Estado de Tlaxcala se localiza geográficamente en la región centro-oriental de la República Mexicana y se encuentra entre los $19^{\circ}05'43''$ y los $19^{\circ}44'07''$ de Latitud Norte y entre $97^{\circ}37'07''$ y los $98^{\circ}42'51''$ de Longitud Oeste; con una extensión territorial de $4\,060\text{ km}^2$, que representa 0.2% del área total del país (Figura 1). El estado de Tlaxcala limita con los estados de Hidalgo, Puebla y Estado de México.

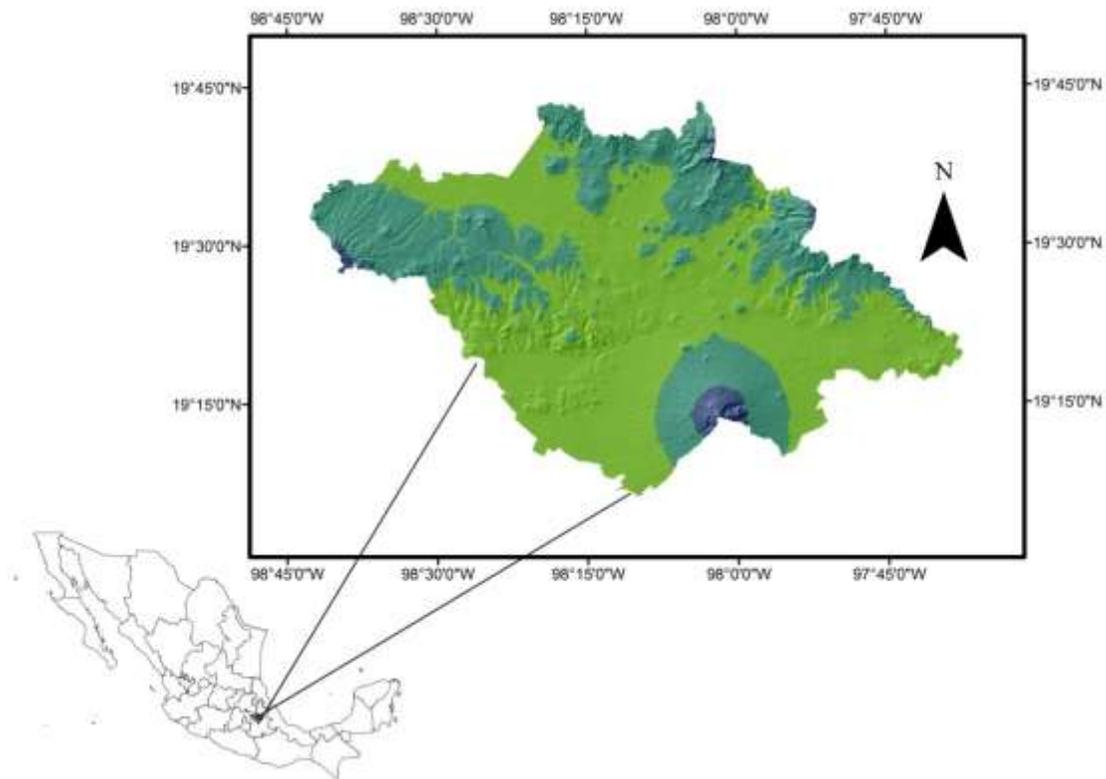


Figura 1. Localización del Área de Estudio.

4.2 *Caracterización Geográfica*

4.2.1 *Relieve*

Tlaxcala está ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico. El paisaje se conjugan sistemas de llanuras aluviales con lomeríos, llanuras con lomeríos de piso rocoso o cementado, lomeríos con cañadas, mesetas con cañadas, mesetas escalonadas con lomeríos y sierras volcánicas con laderas escarpadas (INEGI, Carta de Fisiografía 1:250 000, 2009).

4.2.2 *Geología*

La Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico está caracterizada por la presencia de volcanes como el Popocatepetl, Iztaccíhuatl y La Malinche. La Malinche, con sus 4, 461 msnm domina el panorama del valle de Puebla-Tlaxcala. Los principales materiales geológicos lo constituyen los depósitos piroclásticos de lapilli en la Malinche. A lo largo del Estado dominan las andesitas, dacitas, riolitas, tobas dacíticas, tobas andesíticas, así como las asociaciones riolita-toba dacítica, andesita-dacita, andesita-basalto y toba andesítica-andesitas (Werner, 2012).

4.2.3 *Clima*

El clima de Tlaxcala se define por su situación geográfica cerca de la zona tropical entre los paralelos 19° y 20° de latitud norte. Este se caracteriza por un régimen de lluvias en verano de abril a septiembre y presencia de sequía intraestival en el periodo de mediados del mes de julio a mediados de agosto. De acuerdo con la carta de climas de INEGI (2006), en la Entidad predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano C(w) en 93% del territorio estatal. En las sierras, en alrededor de 6%, se presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano C(E)(w), una mínima porción (<1%) tiene un clima templado semiseco B(S1)(k). Finalmente, por encima de los 4000 msnm en la cumbre del volcán La Malinche, existe un clima frío E(T) en 0.26% del territorio Estatal. Su temperatura media anual es de 13°C; sin embargo, ésta varía con su posición geográfica: en la parte del norte del Estado la temperatura media oscila de 13.7 a

14.5°C, en el sur de 14.5 a 15.2°C y en el sureste las temperaturas medias son mayores a 16 °C. La precipitación total anual oscila entre 433 a 805 mm. En la región sur y parte del centro se presenta la mayor precipitación que va de los 720 a 805 mm; mientras que en la parte oriente (Huamantla, Cuapixtla, Alzayanca) y una parte de la región norponiente se tiene una precipitación de 520 a 620 mm. En la región del Carmen Tequexquitla se registran las menores cantidades de lluvia con un rango de 420 a 520 mm.

4.2.4 Suelos

En la entidad se encuentran diversos tipos de suelos, predominando los Feozems háplicos en 25% de la superficie, Regosoles eutrícos en 20%, Fluvisoles eútrícos en 16%, Cambisoles eútrícos en 15% y Litosoles en 12 % (INEGI, Carta de Edafológica 1:50 000, 2006)

4.2.5 Vegetación

En La Malinche y en las laderas (altitud menor a los 3200 msnm), existen los bosques mixtos de *Juniperus*, *P. montezumae*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus*. En altitudes de 3200 y 3300. Adicionalmente, se encuentran *P. ayacahuite*, *Abies religiosa* y *Quercus lurina*. En altitudes mayores de 3300 las especies se reducen a *P. hartwegii*. Al norte de Tlaxcala bajo condiciones de neblina frecuente, se encuentra el bosque de pino y encinos, en la parte sur de la sierra de Tlaxco domina el *P. patula*. En la parte oriental domina el matorral xerofito. Bajo condiciones de intensa perturbación humana y fuerte pastoreo, es establecen pastizales inducidos (Werner, 2012).

La metodología empleada para la realización del presente estudio consta de seis etapas las cuales se enumeran a continuación: 1) Selección de Municipios; 2) Elaboración de Levantamientos Fisiográficos; 3) Evaluación y Obtención de Información de la Erosión en Campo por el Método de Morgan; 4) Determinación de las Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos; 5) Análisis Mineralógicos y 6) Análisis de los Resultados.

4.3 Selección de Municipios

Con base al mapa de degradación del suelo causada por el hombre (SENARNAT-CP, 2002), se seleccionaron aquellos municipios que presentaban mayor superficie de erosión hídrica con sus diferentes tipos y grados: erosión por pérdida del suelo superficial y erosión por deformación del terreno con presencia de cárcavas y canales. Además, se recopiló información de la cartografía existente sobre geología, climas, hidrología, topografía y cobertura y uso del suelo generadas por INEGI.

4.4 Levantamientos Fisiográficos

Para los municipios seleccionados se realizaron levantamientos fisiográficos adoptando la metodología propuesta por Ortiz y Cuanalo (1984), la cual consiste en delimitar y definir sistemas terrestres y sus respectivas facetas. Para la definición de sistemas terrestres se realizó una corrección de linderos del mapa de la degradación del suelo causada por el hombre, escala 1:250 000 (SEMARNAT-CP, 2002). Posteriormente, se delimitaron las Facetas dentro de cada Sistema Terrestre, utilizando ortofotos en blanco y negro, escala 1:75 000 (INEGI), y se adoptó como criterio de Área Mínima Cartografiable (AMC) a 1 cm².

4.5 Evaluación de la Erosión

Las Facetas se seleccionaron con diferentes grados de erosión, las cuales fueron visitadas a través de recorridos de campo. En cada sitio y con base en la metodología propuesta por Morgan (1997) se reconocieron clases de erosión

codificadas y definidas de acuerdo con sus indicadores. En cada Faceta se realizó un muestreo en áreas de 100 m² por sitio y el número de sitios de muestreo dependió de la severidad y grado del proceso de erosión. Asimismo, se obtuvo información de los factores de formación del suelo directamente en campo.

4.6 Propiedades Químicas y Físicas de Suelos, Sedimentos y Tobas

En los sitios seleccionados se obtuvieron muestras de suelos, de sedimentos y tobas para obtener en el laboratorio sus propiedades físicas y químicas, que se consideraron que estaban relacionadas con el proceso de erosión hídrica.

4.7 Análisis mineralógico de Suelo, Sedimentos y Tobas

De los materiales identificados en campo se obtuvieron muestras de suelo, de sedimento y de las tobas para que en el laboratorio se realizara la identificación y cuantificación de sus minerales dominantes presentes.

4.8 Análisis de Resultados

A partir de la información generada se realizó un análisis de los datos para establecer la relación entre el proceso de erosión hídrica con los factores de formación de suelos, así como con sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, con la finalidad de proponer un modelo de erosión hídrica a nivel estatal y municipal.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Selección de Municipios

5.1.1 Criterios de Selección

De acuerdo con la información del mapa de la Degradación del Suelo causada por el Hombre en el estado de Tlaxcala, escala 1:250,000, los criterios para seleccionar los municipios fueron: 1) superficie municipal y 2) municipios con Sistemas Terrestres que presentaran erosión hídrica con deformación del terreno, 3) erosión hídrica con pérdida de la capa superficial del suelo, y 4) terrenos sin uso o terrenos estables. Con base a estos criterios los municipios seleccionados fueron: Calpulalpan, Tlaxco, Terrenate, Huamantla, Tetla, Españita e Ixtacuixtla (Figura 2).



Figura 2. Mapa de Degradación del Suelo Causada por el Hombre en el Estado de Tlaxcala (SEMARNAT-CP, 2002).

5.1.2 Degradación de suelos en los municipios seleccionados

En Tlaxcala la degradación por erosión hídrica es el segundo proceso de deterioro en 18.27% de su superficie. Los principales tipos de degradación para los municipios seleccionados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadros 1. Extensión Superficial (%) de los Procesos de Degradación en siete Municipios del Estado de Tlaxcala.

Municipio	Superficie		Erosión Hídrica	Erosión Eólica	Degradación Física	Degradación Química
	(ha)	%				
Tlaxco	57,339	14.4	18.33	26.71	6.26	13.58
Calpulalapan	25,500	6.4	16.44	16.64	0.29	31.46
Terrenate	15,076	3.9	5.91	14.45	2.67	26.72
Tetla	16,989	4.2	14.41	21.65	3.25	20.49
Huamantla	34,000	8.7	9.53	43.42	1.38	10.78
Ixtacuixtla	16,322	4.0	51.95	20.58	2.60	11.15
Españita	14,000	3.5	60.21	20.05	--	4.11

En el presente estudio no se consideraron las áreas con degradación química por declinación de la fertilidad (**Qd**), ni con erosión eólica (**Es**).

La erosión hídrica en los siete municipios seleccionados se presenta de la siguiente forma:

- a. Los municipios que muestran erosión hídrica con pérdida del suelo superficial (**Hs**), por superficie son: Tlaxco 7,494 ha (13.07%), y Españita 6,525 ha (46.6%), y los municipios con menor afectación son Huamantla 1,582 ha (4.65%) y Terrenate 21 ha (11.59 %). El otro tipo de erosión hídrica es la que tiene una deformación del terreno con presencia de cárcavas o de canales (**Hc**), y los municipios con este proceso son: Tlaxco 3,015 ha (5.26%) y Huamantla 1,657 ha (4.16%).
- b. Dentro de las áreas susceptibles a procesos degradativos se encuentran las áreas bajo condiciones naturales estables y de gran cobertura vegetal (**SN**). Los municipios con mayor cobertura son: Tlaxco 17,505 ha (30.53%), Calpulalpan 8,058 ha (31.6%) y Huamantla 7,749 ha (22.76%). Otro tipo de

áreas en el estudio original son las Tierras sin uso (**NU**), dentro de las cuales las más representativas son la **NUm** que representa regiones sin uso de montañas áridas. Los municipios con este tipo son: Tetla 3,242 ha (19.08%) y Tlaxco 2,478 ha (4.32%) (Figura 2).

5.2 *Levantamientos Fisiográficos Municipales*

5.2.1 *Corrección de linderos de Sistemas Terrestres*

Los levantamientos fisiográficos realizados a nivel municipal se emplearon como marco de referencia para evaluar la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala y partieron del mapa de degradación del suelo causada por el hombre (SEMARNAT-CP, 2002). Como primer paso se realizó la corrección de los linderos de los **Sistemas Terrestres**, para posteriormente delimitar y definir sus **Facetas** con el enfoque paisajista, trazando sus linderos sobre ortofotos escala 1: 75,000 (INEGI). En las Figuras de la 4 a la 10, se indica la corrección de los linderos de sistemas.

5.2.2 *Selección de Facetas*

Una vez corregidos los linderos de los sistemas terrestres se delimitaron las facetas con ortofotos a escala 1:75,000 (INEGI), las cuales constituyen el marco de referencia geográfico para la selección de sitios de muestreo, considerando los siguientes puntos: 1) el porcentaje de cobertura vegetal, 2) superficie erosionada, 3) áreas agrícolas colindantes de zonas boscosas, 4) material geológico y 5) geoformas.

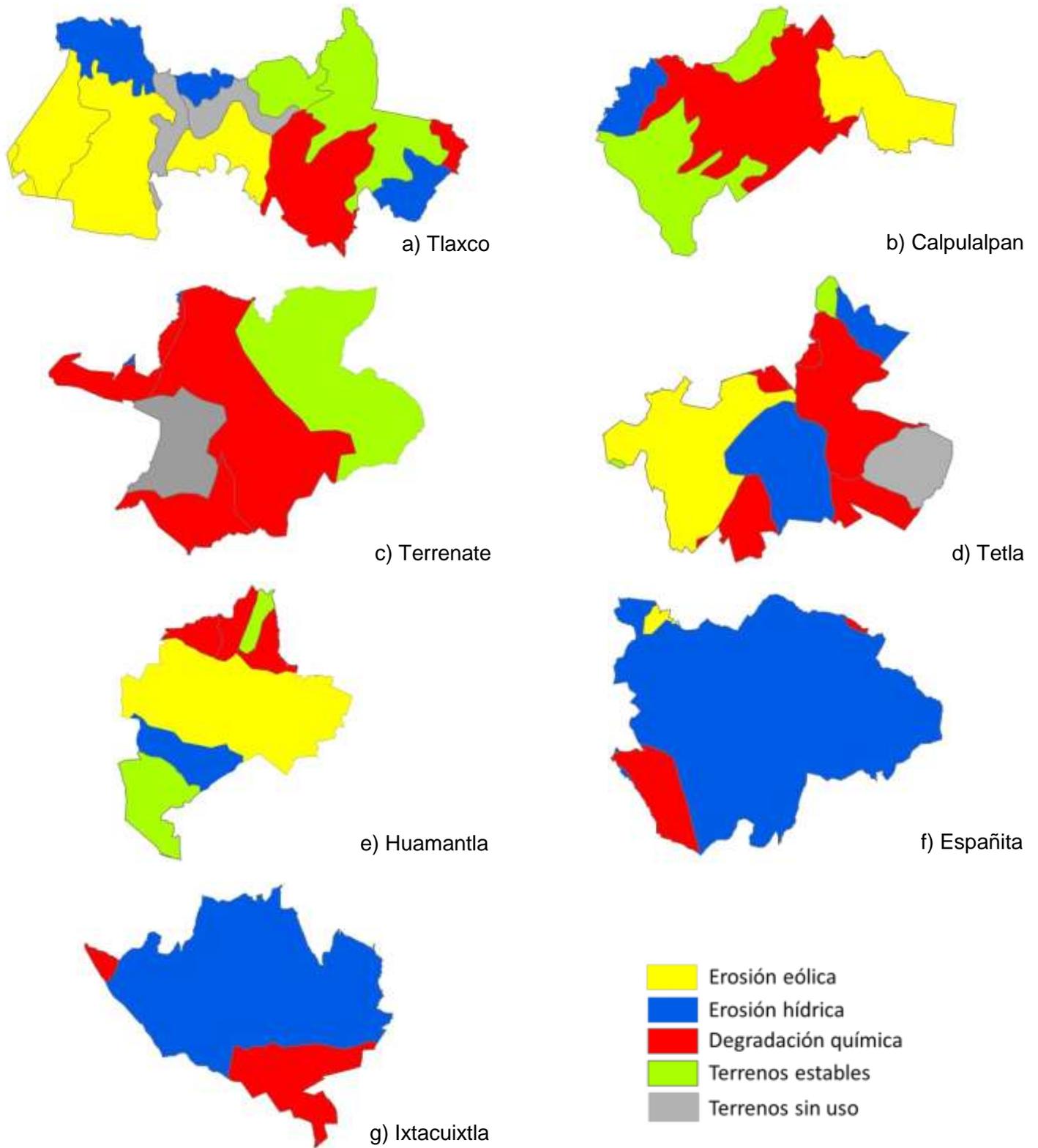


Figura 3. Tipos de degradación dominante en siete municipios de Tlaxcala.

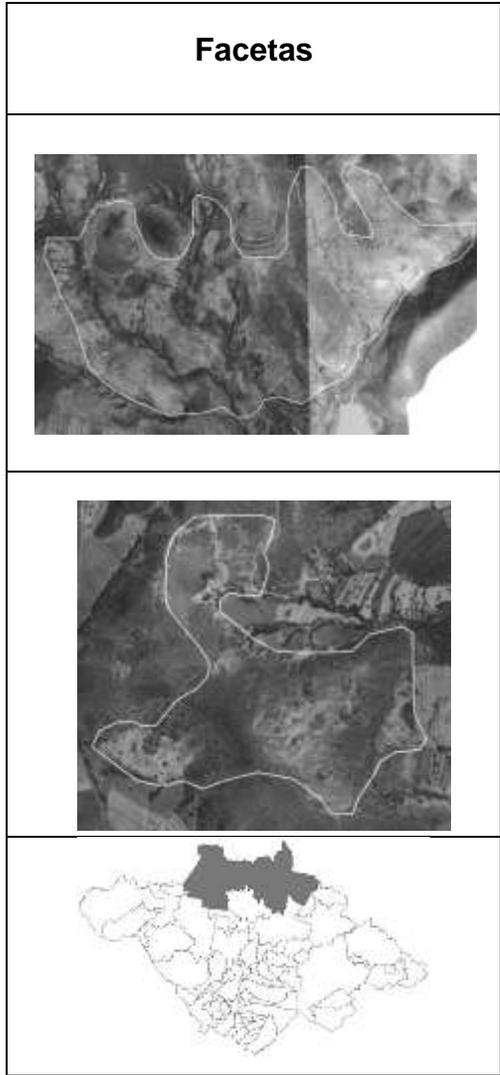
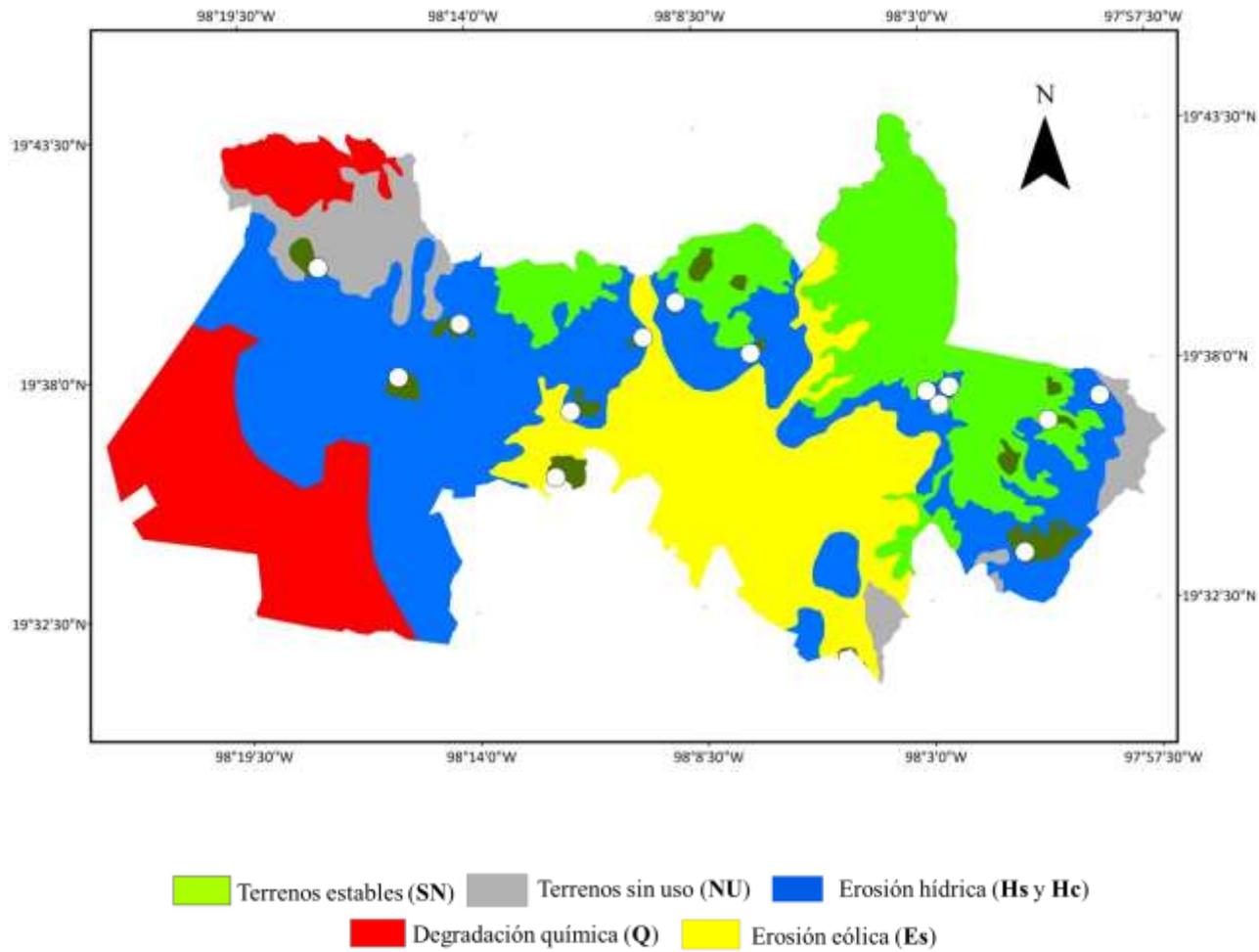
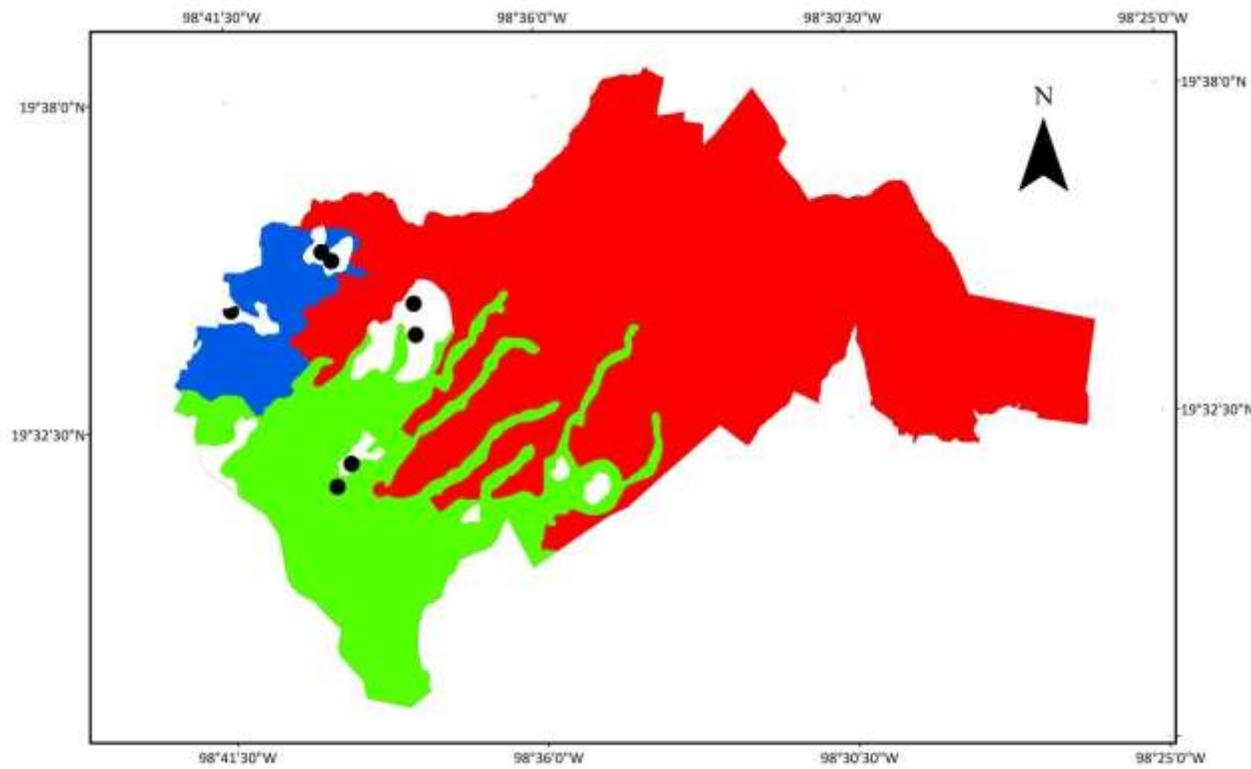


Figura 4. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Tlaxco.



- Terrenos estables (SN)
- Terrenos sin uso (NU)
- Erosión hídrica (Hs y Hc)
- Degradación química (Q)
- Erosión eólica (Es)

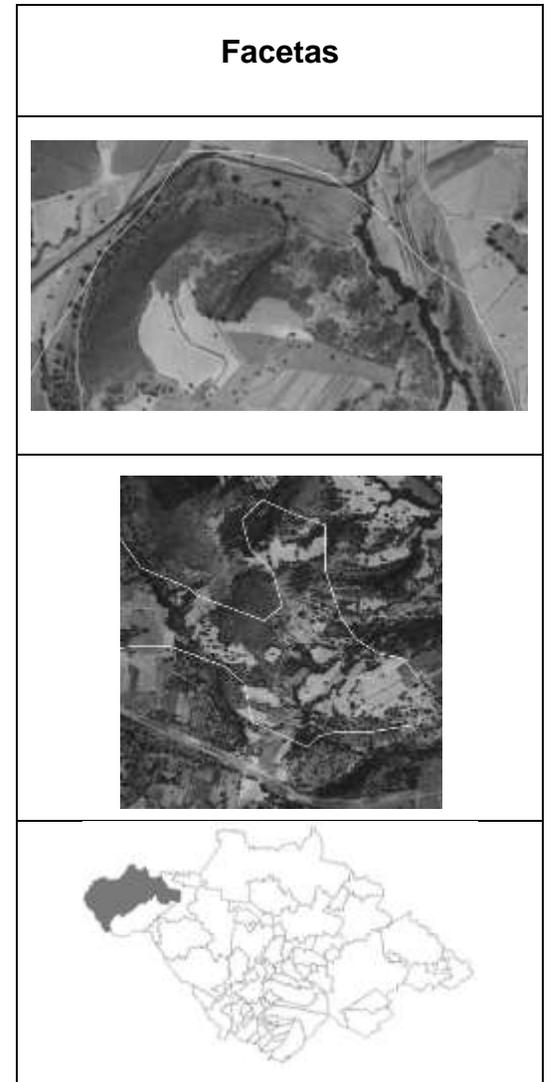


Figura 5. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Calpulalpan.

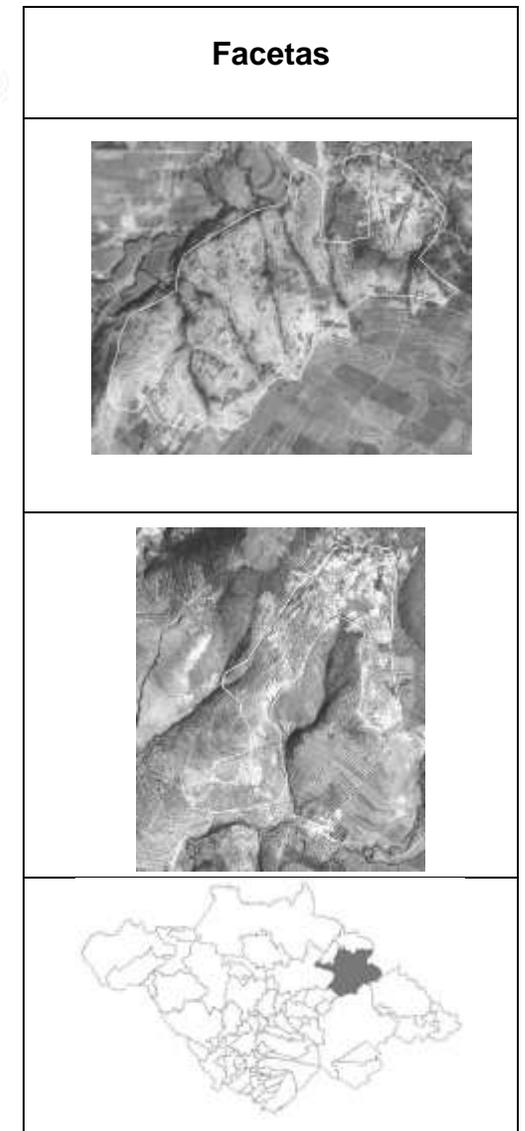
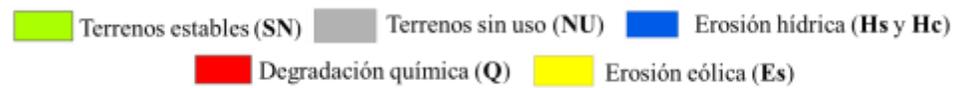
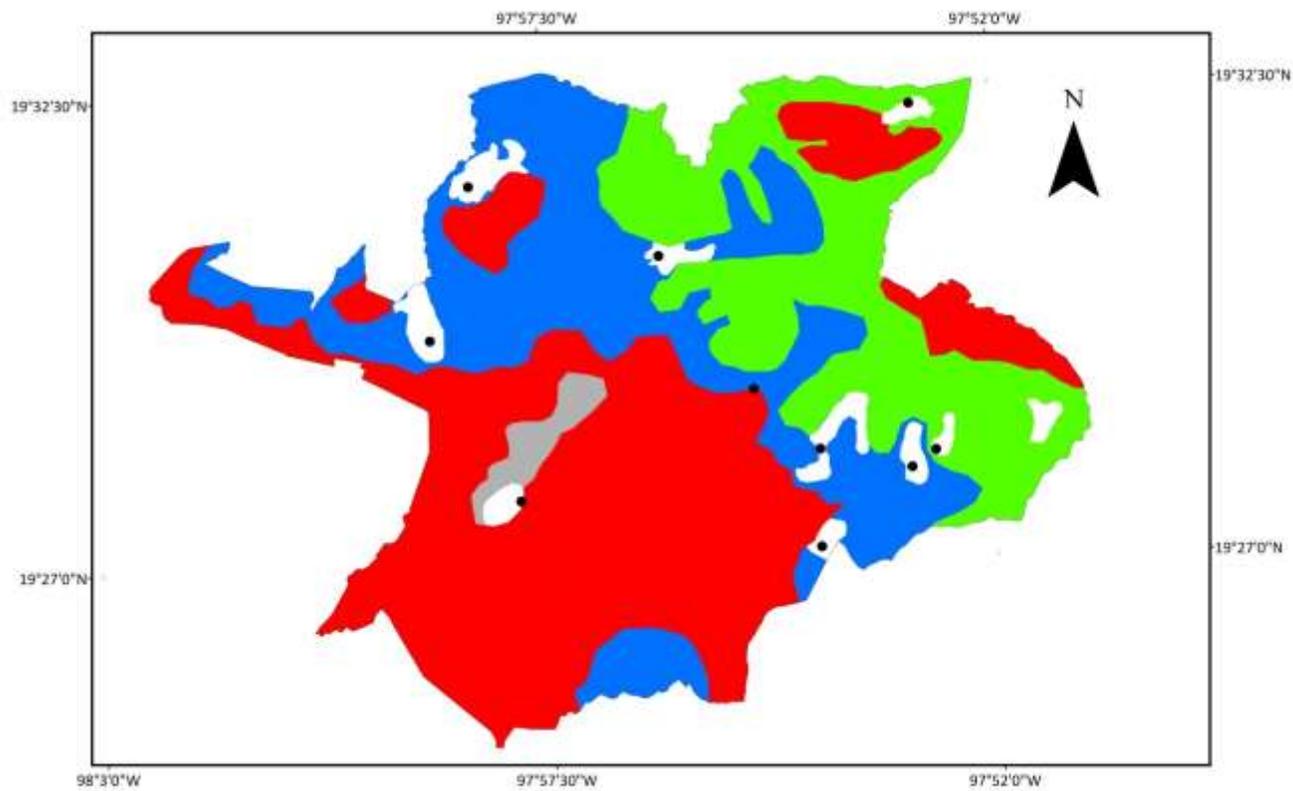
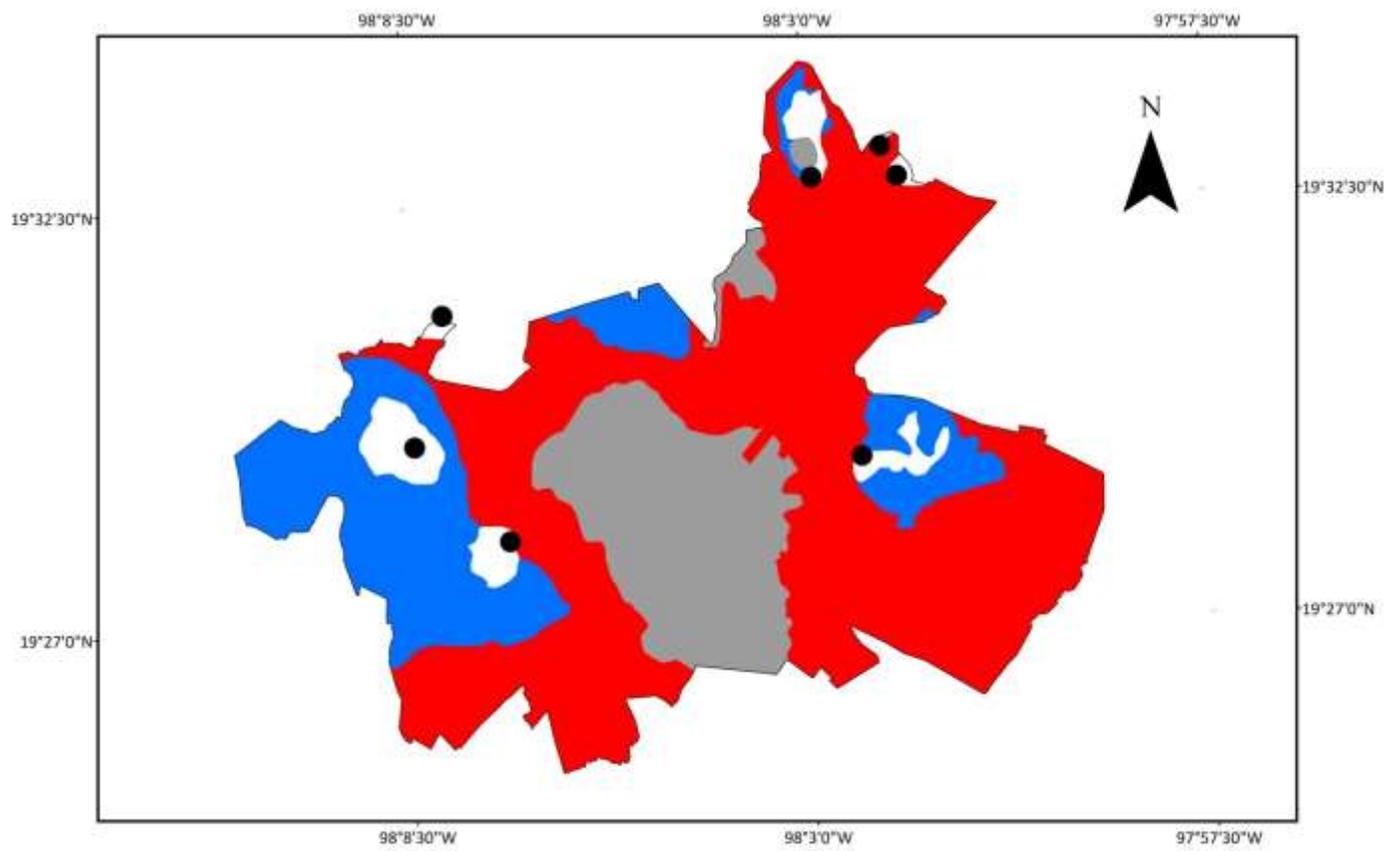


Figura 6. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Terrenate.



■ Terrenos estables (SN)
 ■ Terrenos sin uso (NU)
 ■ Erosión hídrica (Hs y Hc)
■ Degradación química (Q)
■ Erosión cólica (Es)

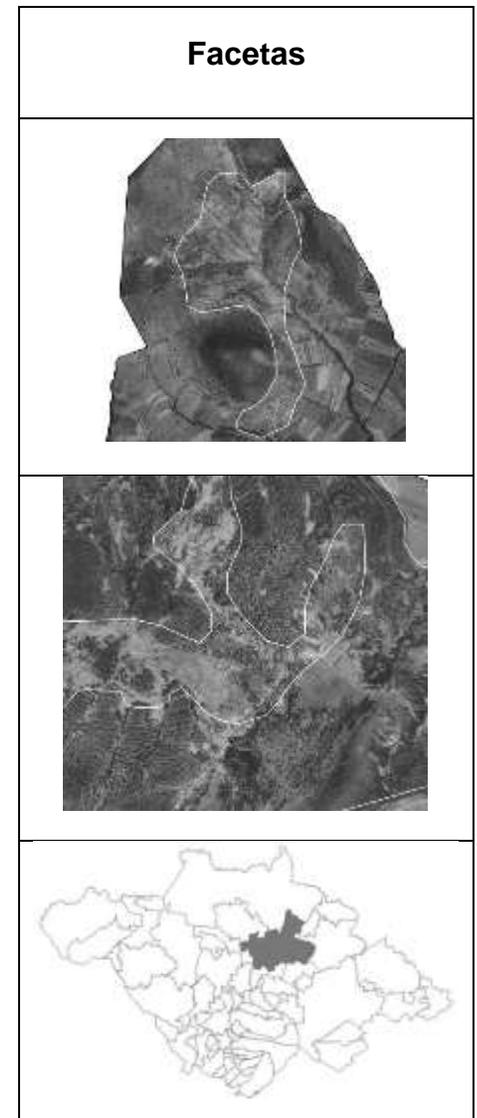


Figura 7. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Tetla.

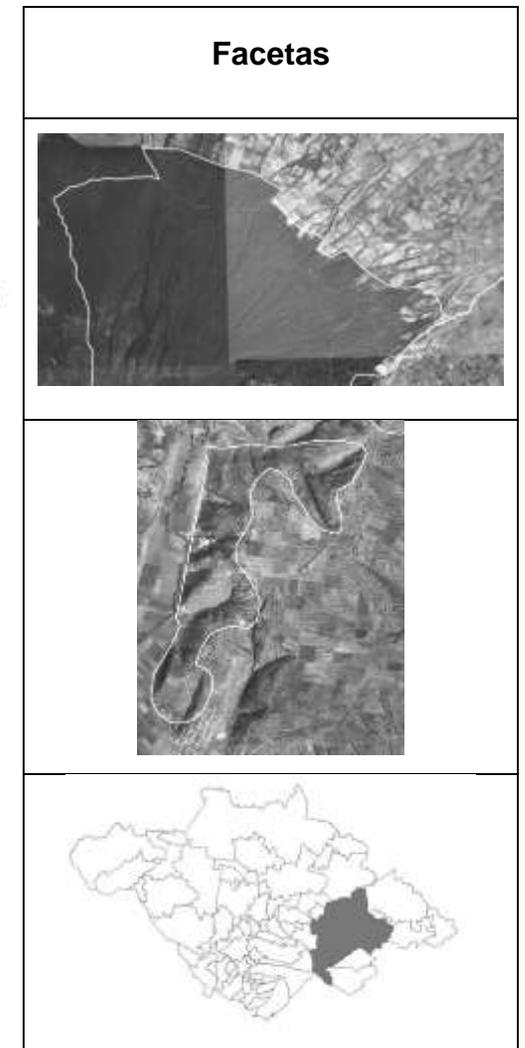
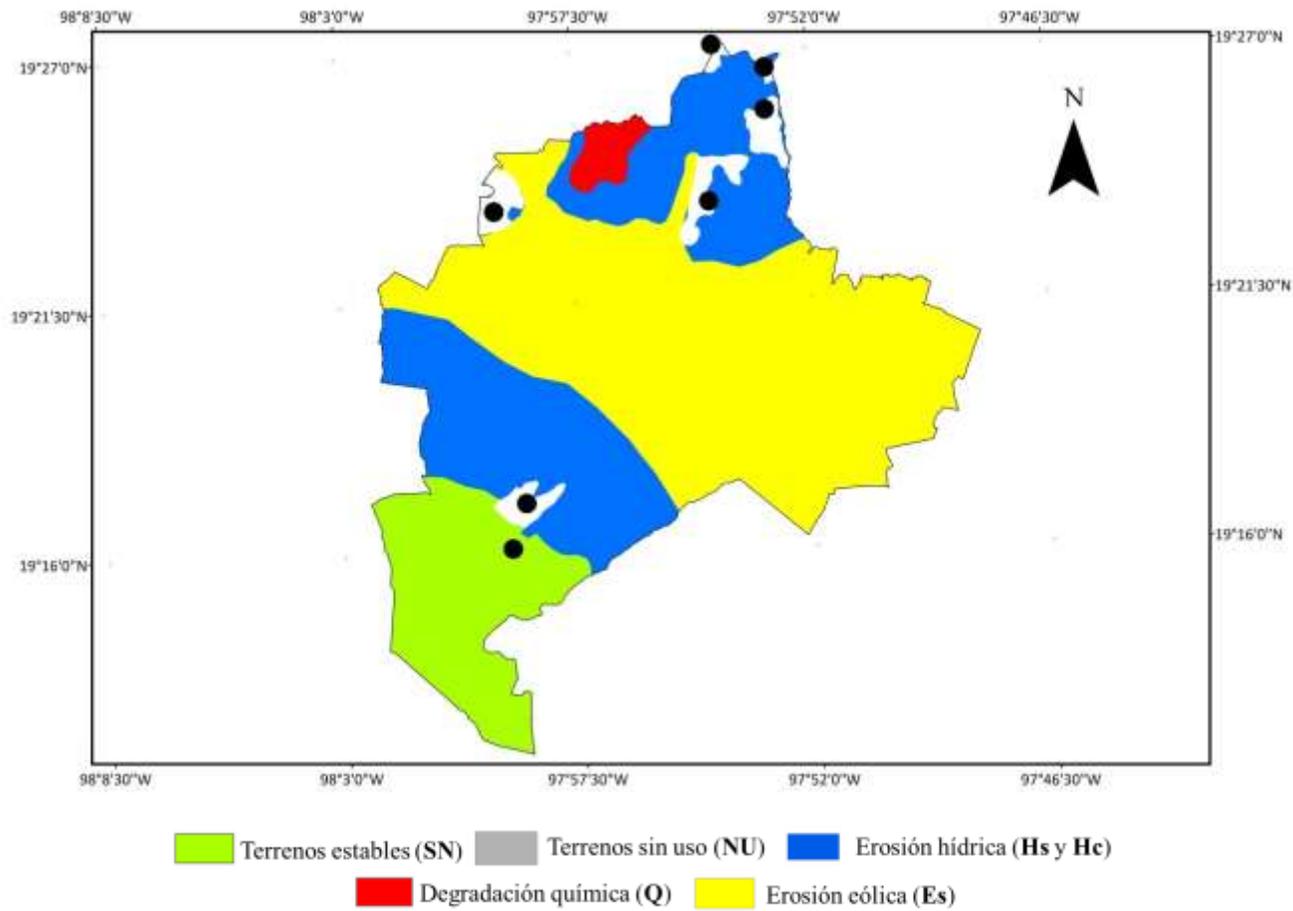


Figura 8. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Huamantla.

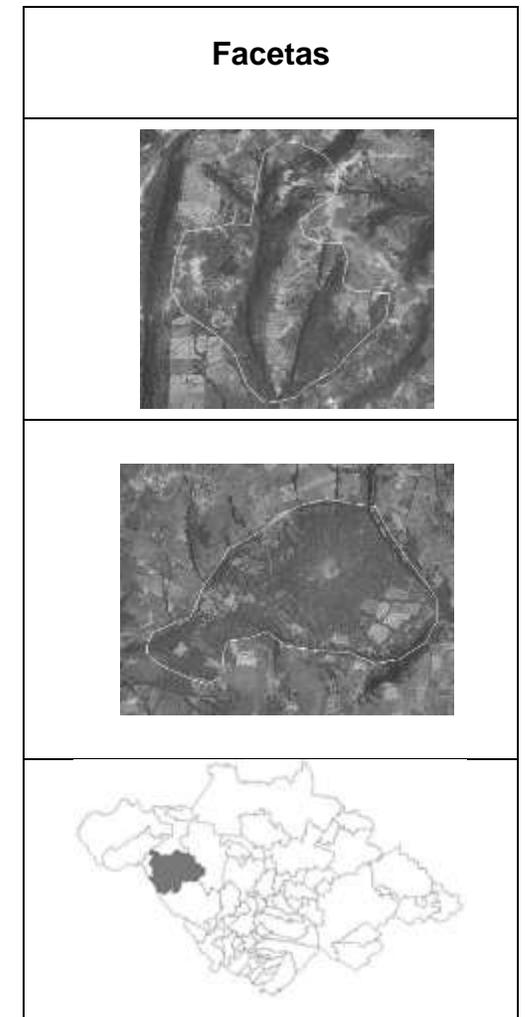
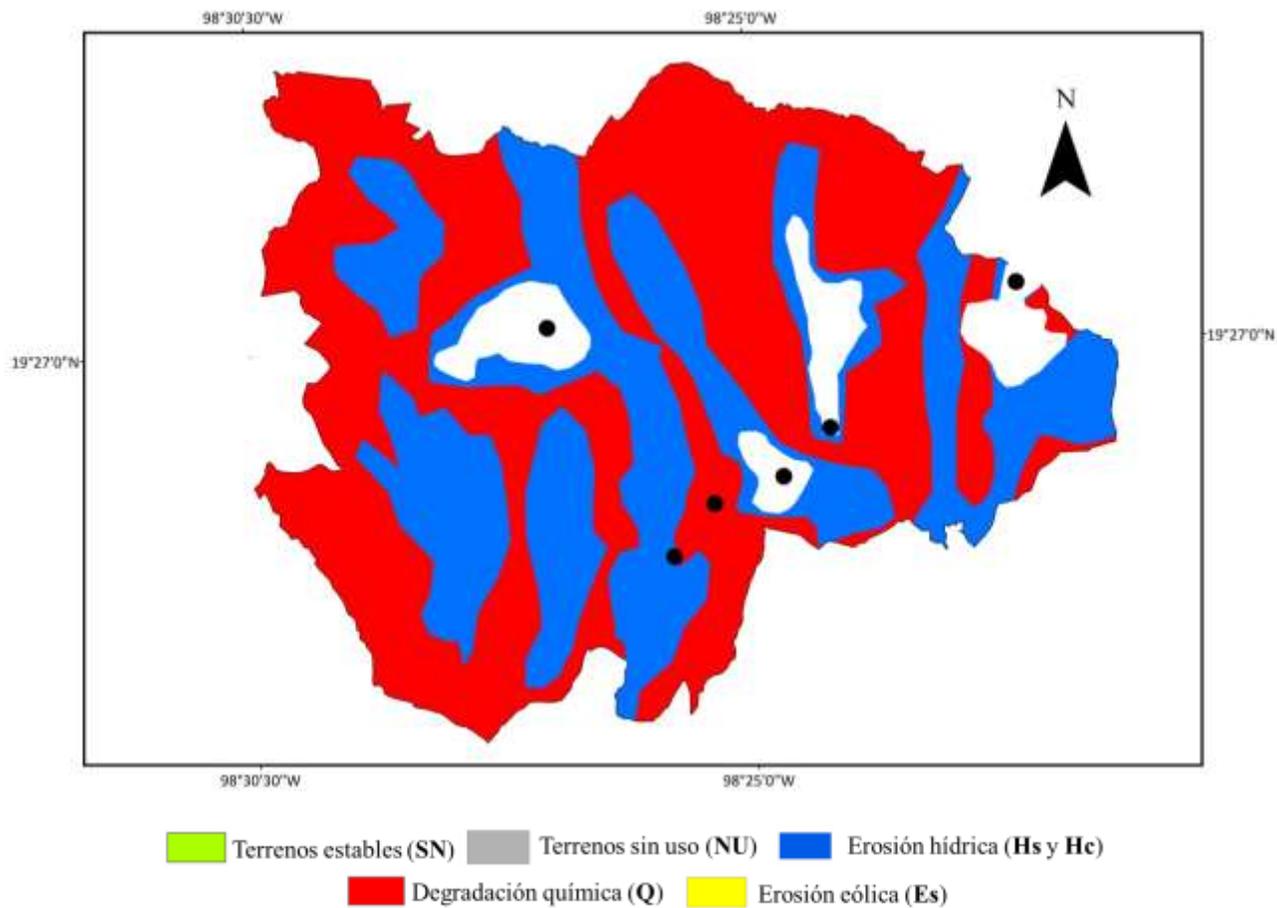


Figura 9. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de España.

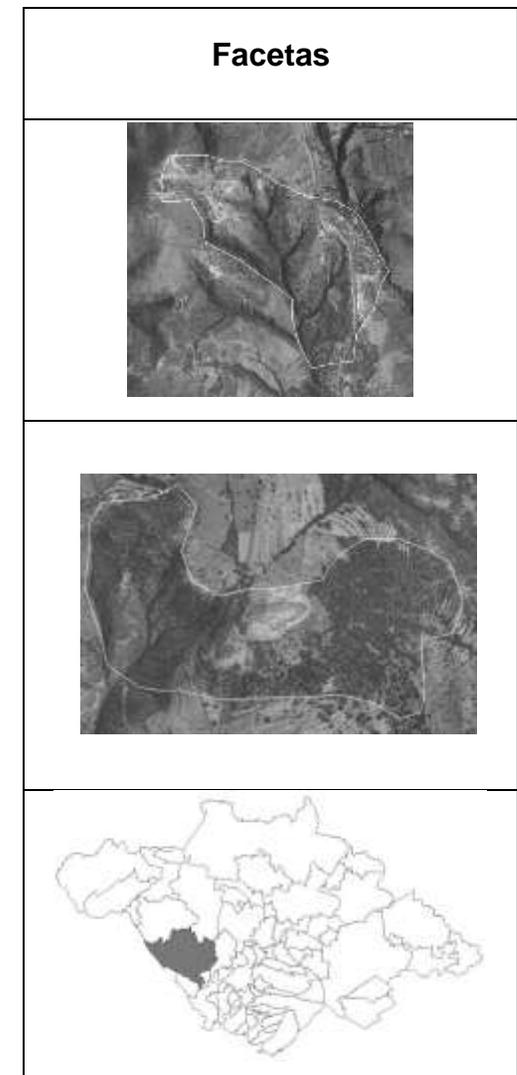
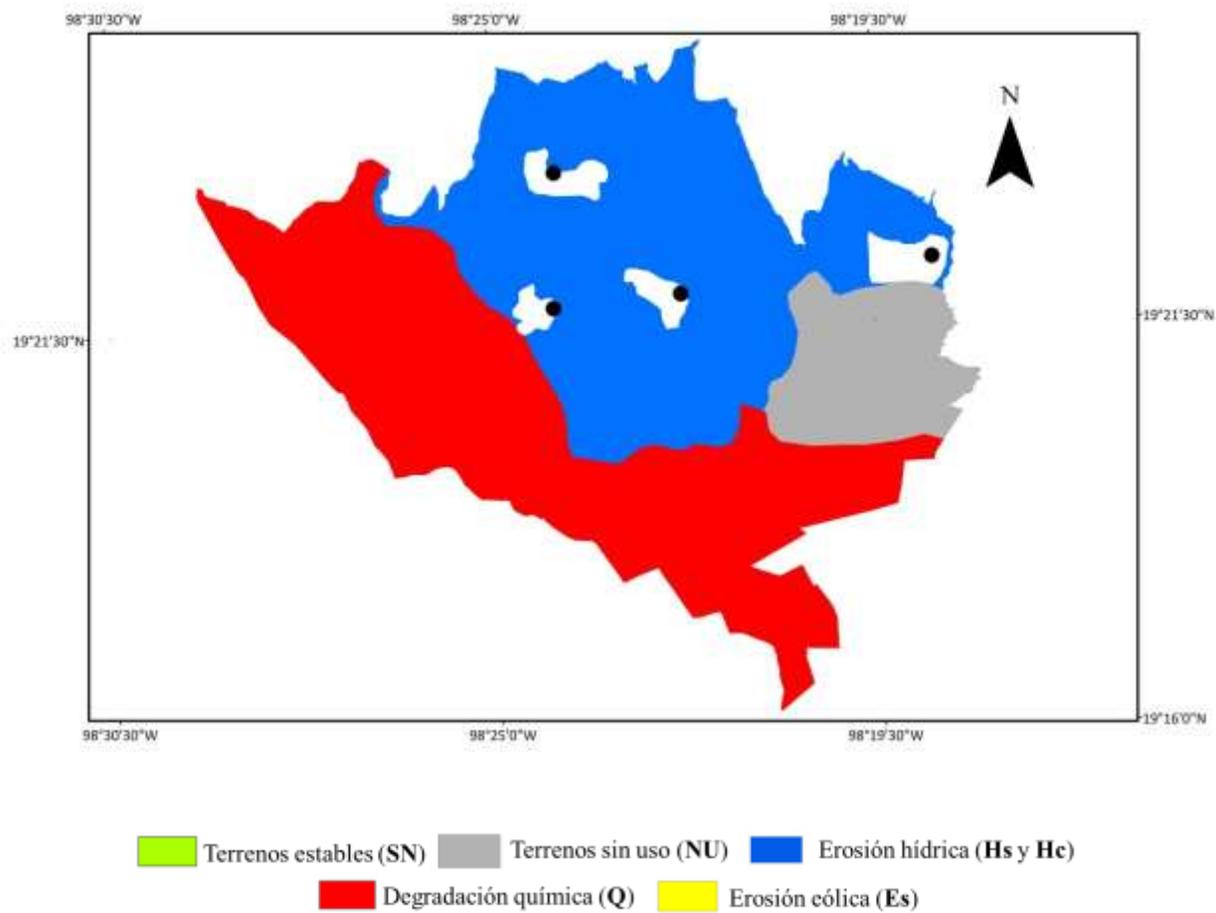


Figura 10. Corrección de linderos y definición de Facetas del municipio de Ixtacuixtla.

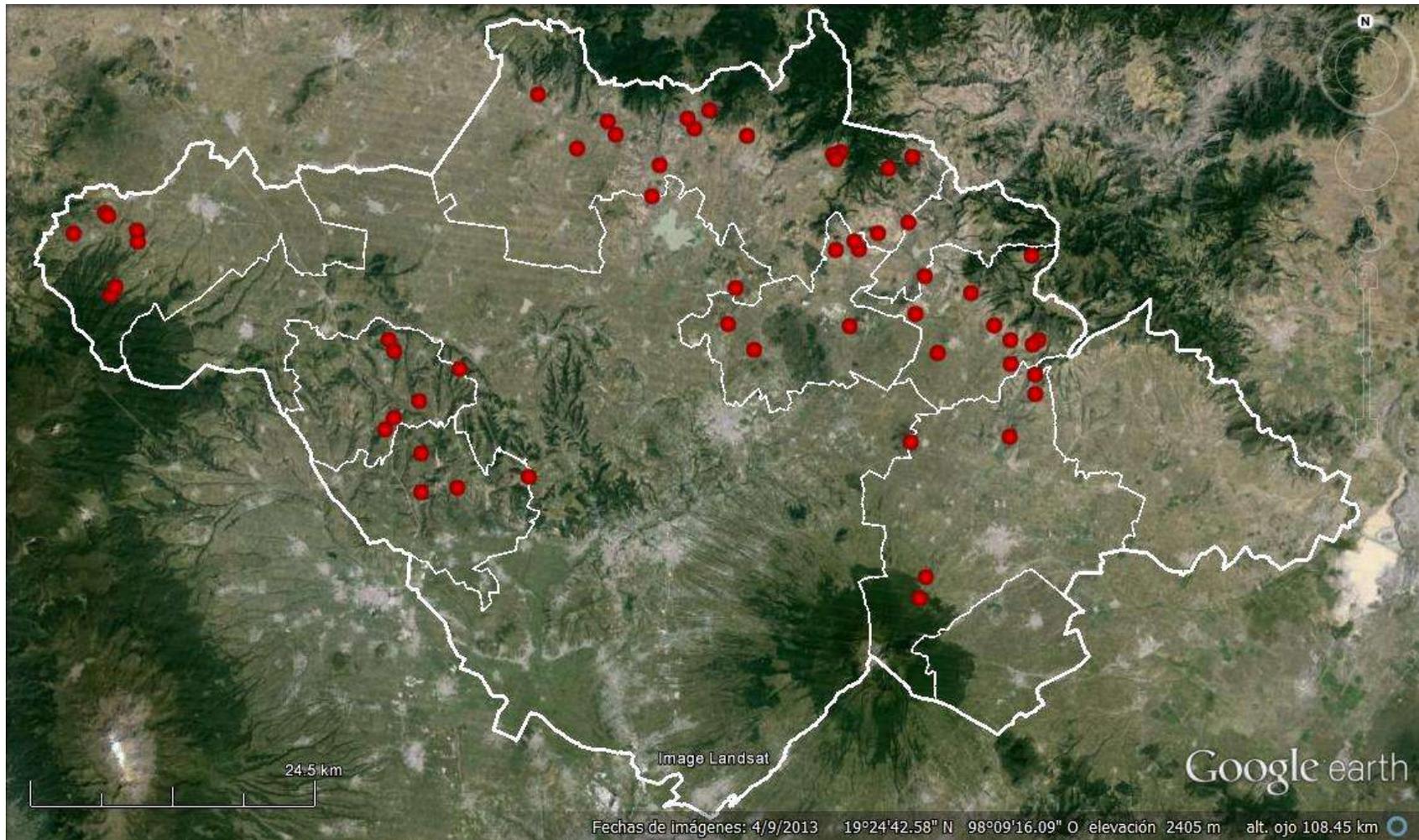


Figura 11. Distribución de los 58 Sitios muestreados en campo.

5.2.3 Evaluación en campo de los sitios de muestreo

Para determinar la severidad de la erosión en campo, en cada sitio seleccionado dentro de una faceta, se buscaron los indicadores correspondientes al sistema de evaluación propuesto por Morgan (1997), que cuenta con diferentes grados de severidad, donde la escala varía de 0 (sin erosión) a 5 (con erosión muy severa), como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadros 2. Indicadores de la erosión del suelo según Morgan (1997).

Clase	Indicador en campo
0	Raíces de árboles no expuestas; sin costras superficiales, ni pedestales por salpicadura; cobertura vegetal en más del 70%.
½	Ligera exposición de raíces de árboles; pocas costras superficiales; sin pedestales; nivel del suelo ligeramente más elevado pendiente arriba; cobertura vegetal del 30-70%.
1	Exposición de raíces de árboles, formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelos cubiertos con vegetación, con profundidades de 1-10 mm; ligera costra superficial; cobertura vegetal del 30-70%.
2	Exposición de raíces de los árboles, formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 1-5 cm; costras superficiales; cubierta vegetal del 30-70%.
3	Exposición de raíces de árboles, formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 5-10 cm; costras superficiales de 2 a 5 mm de espesor; hierba enlodada por arrastre de material hacia la parte baja de la pendiente; arrastre de materiales gruesos por el agua y el viento; cobertura vegetal menor al 30%.
4	Exposición de raíces de árboles, pedestales y montículos de suelo de 5-10 cm de profundidad; arrastre de materiales gruesos; canalillos hasta de 8 cm de profundidad; suelo desnudo.
5	Cárcavas; canalillos mayores de 8 cm de profundidad; arrastre de partículas por el agua; suelo desnudo.

Los resultados mostraron que solo se presentan las clases 0 (sin erosión), 3 (erosión moderada), 4 (erosión severa) y 5 (erosión muy severa), cuya descripción se reporta a continuación:

a) Clase 0, sin erosión

Se identificaron cinco sitios, que por su ubicación geográfica corresponden a áreas con cobertura de bosques de pino y pastizal inducido. Las zonas de bosque se encuentran bajo manejo forestal y una parte es considerada como Parque Nacional. Los suelos son profundos (>1m). Las geoformas predominantes son laderas cóncavas. Las pendientes oscilan entre 15 y 40%. Los sitios se ubican en la faceta 5 de Terrenate, la 1 y 9 de Tlaxco, la 1 de Calpulalpan y la 1 de Huamantla. El material geológico está constituido por formaciones de origen volcánico de diversos tipos de roca extrusiva tales como basalto, dacita, pómez y tezontle; además de materiales piroclásticos como son cenizas volcánicas y toba. Dada a la gran cobertura vegetal tanto arbórea como arbustiva los sitios muestreados no presentan erosión hídrica (Figura 12).



Figura 12. Paisajes de los Sitios Sin Erosión Hídrica.

En cada sitio se obtuvieron muestras de suelo, las cuales fueron analizadas en laboratorio y algunos de sus datos se reportan en el Cuadro 3. La textura del suelo es variada y presentan un alto contenido de materia orgánica.

Cuadros 3. Descripción de los Sitios Seleccionados Sin Erosión.

Municipio	Faceta	SUELO		Proceso erosivo	Material geológico asociado al suelo
		Textura	M.O		
Terrente	5	Migajón Limoso	2.12	N/P	Basalto
Tlaxco	9	Migajón Arcillo Limoso	2.80	N/P	Toba
Calpulalpan	1	Franco arcillosa arenosa	1.42	N/P	Toba amarilla
Huamantla	1	Arena Migajosa	3.09	N/P	Dacita, pómez
Tlaxco	1	Migajón Limoso	2.32	N/P	Tezontle

b) Clase 3, Erosión Moderada

En esta categoría se identificaron cuatro sitios, los cuales presentan una cobertura vegetal menor de 30%. Los sitios se encuentran a pie de monte en lomeríos medios y bajos en una zona con una topografía irregular y con pendientes entre 7 y 10%. Estos sitios se caracterizan por ser zonas de actividad agrícola de temporal, principalmente con el cultivo de maíz. Otra característica es que se encuentran en la frontera con el bosque. El material geológico está constituido por dacita, basalto y toba. En los dos los suelos son moderadamente profundos (>50cm), y en los restantes los suelos están asociados con tobas a poca profundidad (<40cm). Los sitios se encuentran en las facetas 4 de Tlaxco, 2 de Huamantla, 3 de Calpulalpan y 3 de Terrenate. No presentan ningún tipo de erosión hídrica; sin embargo, son suelos susceptibles a ella por su uso agrícola de temporal y por estar expuestos a los factores erosivos (Figura 13).



Figura 13. Paisajes con Erosión Hídrica No Aparente.

Sus características químicas y físicas muestran que la clase textural dominante es la migajón limoso con altos contenidos de materia orgánica (Cuadro 4); asimismo, se encontró otro sitio con textura arena migajosa y con bajo contenido de materia orgánica. El pH del suelo es moderadamente ácido.

Cuadros 4. Descripción de los sitios seleccionados con erosión moderada.

Municipio	Sitio	SUELO		Proceso erosivo	Material geológico asociado con el suelo
		Textura	M.O		
Calpulalpan	3	Migajón-Limoso	1.90	N/P	Toba amarilla
Terrente	3	Migajón-Limoso	1.54	N/P	Toba amarilla
Tlaxco	4	Migajón-Limoso	2.70	N/P	Basalto
Huamantla	2	Arena-Migajosa	0.19	N/P	Dacita

c) Clase 4, Erosión Severa

Esta clase corresponde a los sitios de las facetas 5, 7 y 2 de Calpulalpan y 1 de Tlaxco; presentan una cobertura arbórea menor de 30%. Las geofomas predominantes son las laderas cóncavas, con pendientes de 10 a 30%. El material parental está constituido por tobas volcánicas, con movimiento superficial de rocas

con procesos de intemperismo físico (Figura 14). Los sitios se encuentran en áreas de bosque fragmentado por intervención antrópica para el establecimiento de áreas agrícolas de temporal dedicadas al cultivo de maíz, avena o cebada. Los suelos son someros a poco profundos asociados con el afloramiento de tobas y con la formación evidente de canalillos de 10 a 15 cm de profundidad.



Figura 14. Paisaje Representativo con Erosión en Canalillos.

Para estos sitios se muestreo el material que se encontraba dentro de los canalillos, los cuales presentaron texturas variadas y materia orgánica presente es pobre (Cuadro 5). En los sitios muestreados domina principalmente la toba amarilla.

Cuadros 5 Descripción de los sitios seleccionados con Erosión Severa.

Municipio	Sitio	SEDIMENTO		Proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Calpulalpan	5	Arena-Migajosa	0.32		Toba amarilla
Calpulalpan	7	Arcilloso	0.64	Canalillos de 10 cm de profundidad	Toba amarilla
Tlaxco	1	Franco	0.45	Canalillos de 15 cm	Toba cristalina riolítica y arrastre de andecita-dacita
Calpulalpan	2	Franco	0.55	10 cm de profundidad	Toba amarilla con vidrio volcánico

d) Erosión Muy Severa

La cobertura está constituida de vegetación secundaria, principalmente de sabino (*Juniperus* sp.). Las geoformas predominantes son laderas cóncavas y con pendientes variadas. Cada uno de los sitios se agrupó de acuerdo con características particulares que presentaron, a continuación se describen:

Los Sitios 11 de Terrenate y 13 de Tlaxco se identificaron por tener suelo somero, poca vegetación arbustiva y la superficie del suelo cubierto por pastizal, pendientes de 10 a 40%; presentan rocas de diferente tamaño como basalto y dacita mezcladas con el suelo. No tiene formas de erosión evidentes o de gran magnitud, sólo arrastre de partículas superficialmente del suelo. Por otra parte, los sitios 5 de Tetla y 14 de Tlaxco, presentaron una vegetación de árboles de sabino, nopal, maguey pastizal. A diferencia de los sitios anteriores, estos presentaron movimiento superficial de rocas de tezontle y basalto, con pendientes entre 15 y

35%, suelos poco profundos ($\leq 40\text{cm}$) seguido de una toba, la principal causa visible de erosión hídrica es la pérdida de suelo por desprendimiento (Figura 15).



Figura 15. Paisaje Representativo de áreas abandonadas con suelo mezclado con rocas, erosión hidrica causa desprendimiento de suelo y el arrastre de material rocoso.

En el Cuadro 6 se muestran un alto contenido de materia orgánica con pH ligeramente ácido y presentan una textura dominante de migajón limoso.

Cuadros 6. Descripción de los sitios seleccionados erosión muy severa con desprendimiento.

Municipio	Sitio	Suelo		Proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Terrente	11	Migajón-Limoso	1.22	Arrastre superficial de suelo	Dacita y toba amarilla
Tlaxco	13	Migajón-Limoso	1.45		Basalto
Tetla	5	Franco	1.35	Desprendimiento de suelo	Tezontle, basalto
Tlaxco	14	Migajón-Limoso	1.48		Tezontle, basalto

Otra característica de erosión muy severa es aquella donde el suelo se ha perdido y han quedado como evidencia pedestales por causa de la erosión por salpicadura y laminar. El Sitio 15 de Tlaxco, 6 de Terrenate, presentan toba formando pisos duros y rugosos, con pedestales de 15 cm a 1 m, protegido en la parte superior con vegetación principalmente de sabino, yuca y pastizales. El suelo presente contiene un moderado contenido de materia orgánica. Sin embargo, el paisaje está dominado por la exposición de la toba amarilla cuya característica se presenta como un piso duro y rugoso y poco movimiento de material rocoso. La geomorfología es convexa y con pendientes entre 15 y 35% (Figura 16).



Figura 16. Paisaje representativo de la toba presente.

Los Sitios 7 de Tetla, 10 de Terrenate y 7 de Tlaxco se caracterizan por el afloramiento de tobas en constante fragmentación y asociadas con rocas de basalto y tezontle en diferentes tamaños. Los materiales están en constante movimiento por efecto de la pendiente y el agua. Una cobertura vegetal se presenta en forma de manchones de pastizal, arboles de sabino presentes en forma dispersa y para el caso 7 de Tetla presenta áreas con superficie reforestada de Eucalipto (*Eucalyptus citriodora* Hook.). En cuanto a sus propiedades químicas y físicas de la toba son de textura variada y tienen un contenido de pobre en materia orgánica (Cuadro 7).

Cuadros 7. Descripción de los sitios de las facetas seleccionadas.

Municipio	Sitio	Toba		Forma de proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Tlaxco	15	Migajón Limoso	0.13	Piso rugoso	Toba amarilla
Terrenate	6	Migajón Arenoso	0.51	Piso rugoso	Toba roja
Huamantla	5	Arena migajosa	0.64	Afloramiento de toba	Toba amarilla
Tlaxco	7	Migajón Limoso	0.26	Piso rugoso	Toba amarilla
Tetla	7	Migajón Arenoso	0.19	Fragmentación de toba	Toba amarilla
Terrenate	10	Migajón Limoso	0.26	Fragmentación de toba	Toba amarilla

Dentro de la Erosión Severa se encontraron otros sitios que presentaban características diferentes a las anteriores. Una evidencia visible son los relictos, por su altura (>1m) indicador de la pérdida del suelo. Los Sitios 2 de Tetla, 16 y 6 de Tlaxco, 4 de Calpulalpan muestran la exposición de la toba con movimiento de materiales rocosos de diferentes tamaños. La toba amarilla es la que se presenta en la mayoría de los sitios muestreados, sus características principales son: dura de consistencia y rugosa de superficie. El Sitio 2 de Tetla presentó dos tobas diferentes: toba amarilla y le subyace la toba blanca. Por otra parte, el Sitio 3 de Tetla presentó dos diferentes tobas una amarilla y le subyace la toba roja con forma columnar y escalonada (Figura 17).



Figura 17. Paisajes representativos con presencia de toba.

Estas tobas presentan texturas variadas y un bajo contenido de materia orgánica (Cuadro 8).

Cuadros 8. Descripción de las tobas de los sitios seleccionados.

Municipio	Faceta	Toba		Forma del proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Calpulalpan	4	Franco	0.26	Erosión laminar, movimiento de rocas	Toba roja
Tetla	1	Franco	0.58	Movimiento de roca	Toba roja
Tlaxco	16	Migajón Limoso	0.32	Piso duro y rugoso con movimiento de rocas	Toba amarilla
Tlaxco	6	Franco	0.19	Piso rugoso	Toba amarilla
Tetla	6	Migajón Limoso	0.13	Erosión laminar	Toba Blanca
Tetla	2	Franco/Migajón arenoso	0.26/0.32	Erosión laminar	Toba amarilla/toba blanca
Tetla	3	Migajon limoso	0.39	Piso duro y rugoso/piso en escalonada con forma de columnas	Toba amarilla/Toba roja
Tlaxco	5	Franco	0.19	Fragmentación de Toba	Toba amarilla

Los Sitios 2, 3, 10 y 11 de Tlaxco y 1 de Terrenate presenta toba en forma rugosa medianamente dura y escalonada (Cuadro 9).



Figura 18. Paisaje representativo de las características visibles superficiales de las tobas.

Estos sitios presentan una vegetación de pastizal y árboles de *Juniperus* sp dispersos; la geoforma es convexa y pendientes de 15 a 35%. No presenta material rocoso; sus texturas son diversas y las tobas son pobres en materia orgánica (Figura 18).

Cuadros 9. Características físicas y químicas de la toba.

Municipio	Faceta	Toba		Proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Tlaxco	3	Migajón arcilloso	0.19	Piso rugoso	Toba roja
Terrenate	1	Franco	0.26	Piso rugoso y escalonado	Toba roja
Tlaxco	2	Franco	0.00	Piso rugoso	Toba roja
Tlaxco	11	Migajón limoso	0.32	Piso rugoso	Toba amarilla
Tlaxco	10	Migajón arcilloso	0.51	Piso duro y rugoso	Toba amarilla

Retomando la evaluación de la Erosión Muy Severa existen sitios con mayor extensión y afectación por diferentes formas: erosión laminar y formación de cárcavas (>50m), áreas donde el suelo se perdió y el paisaje es dominado por grandes áreas de toba de dos o tres tipos diferentes. En estos sitios hay movimiento de grandes cantidades de material rocoso, así como sitios donde el material rocoso se encuentra fuertemente intemperizado moviéndose sobre la superficie del terreno con tamaños variados.

Los Sitios 4, 7 y 9 de Terenate y 12 de Tlaxco se encontraron cárcavas mayores a 30m, cuya evidencia se muestra primeramente en la pérdida del suelo y posteriormente, la interacción de factores como el clima y la topografía formación de grandes cárcavas sobre la toba. La vegetación se encuentra dispersa sobre la superficie del terreno y está conformada principalmente de maguey, *Juniperus*. En Tlaxco se encontró el arbusto "Tlaxistle" (*Amelanchier denticulata* (Kunth) K. Koch),

especie de importancia económica en el Estado para la elaboración de artesanías (Figura 19).



Figura 19. Paisajes con erosión muy severa por formación de cárcavas muy profundas.

En campo se identificaron tres tipos de tobas volcánicas: amarilla, roja y blanca. Aparte del color se encontró que presentaba rasgos físicos diferentes; es decir, unas presentaban piso duro y rugoso, otras de manera escalonada o de forma columnar. Las diferentes tobas encontradas presentan texturas diversas, y bajo en contenido de materia orgánica (Cuadro 10).

Cuadros 10. Características físicas y químicas de las tobas.

Municipio	Faceta	Toba		Formas del proceso erosivo	Material geológico asociado al proceso erosivo
		Textura	M.O		
Terrenate	9	Migajón limoso/Franco	0.10	Formación de cárcavas	Toba amarilla/toba roja
Terrenate	7	Migajón limoso	0.26	Cárcavas poco profundas	Toba blanca
Terrenate	4	Migajón arenoso	0.32	Movimiento de rocas	Toba amarilla
Tlaxco	12	Migajón Arenoso	0-16	Formación de cárcavas de >30m	Toba Blanca

5.2.4 Análisis mineralógico

Para clasificar las tobas se evaluó la composición mineralógica en la fracción fina (<2µm) del suelo. Heinrich (1972), clasifica a las tobas con base a su naturaleza de origen en tobas vítreas, tobas cristalinas y tobas líticas. En Tlaxcala se encontraron las tobas cristalinas dacíticas (toba amarilla) cuya mineralogía está compuesta por: hornablenda, piroxeno, plagioclasas sódica y cuarzo. En las tobas cristalinas riolíticas (Toba roja) dominan el cuarzo, sanidina, biotita, hornablenda y con menor frecuencia la augita. Además se observó vidrio volcánico sobre la superficie de la toba.

Como ya se mencionó, en campo las tobas se identificaron de acuerdo con su color y forma; sin embargo, en el laboratorio se consideró su mineralogía, densidad aparente y pH. Los resultados muestran que las tobas presentan rocas mezcladas con el suelo o en movimiento en la superficie de la toba. Por su mineralogía estas son de naturaleza basáltica, o dacítica, además de tezontle (escoria volcánica) y pómez hacia la malinche. Los resultados de densidad aparente indican que tienen un bajo porcentaje de espacio poroso el cual inhibiría el desarrollo radicular de las plantas (Brady y Weil, 1999).

Cuadros 11. Propiedades de las tobas.

Toba	Faceta	Color		Dap Mg m ⁻³	pH
		Seco	Húmedo		
Tobas cristalinas dacíticas (Toba amarilla)	Tlaxco 10	10YR 7/4 Pardo muy claro	10YR 4/6 Pardo amarillento oscuro	1.38	7.0
	Tlaxco 11	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 5/4 Pardo amarillento	1.54	7.0
	Tlaxco 15	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 3/6 Pardo amarillento oscuro	1.54	7.8
	Tlaxco 16	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.65	7.0
	Terr 4	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.71	7.3
	Tetla 7	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	7.5YR 4/4 Pardo	1.52	7.9
	Tetla 6	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 5/4 Pardo amarillento	1.55	7.2
	Tetla 3	10YR 5/4 Pardo amarillento	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	1.57	6.6
	Tetla 6	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 5/4 Pardo amarillento	1.55	7.2
	Tetla 7	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	7.5YR 4/4 Pardo	1.52	7.9
Tobas cristalinas riolíticas (Toba Roja)	Tlaxco 2	10YR 5/6 Pardo amarillento	7.5YR 3/4 Pardo muy oscuro	1.69	7.6
	Terr 1	10YR 5/4 Pardo amarillento	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	1.64	6.0
	Tlaxco 3	7.5YR 4/6 Pardo fuerte	5YR 3/4 Pardo rojizo oscuro	1.60	6.4
	Terr 9	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 3/4 Pardo amarillento oscuro	1.30	7.2
	Tlaxco 14	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	10YR 3/6 Pardo amarillento oscuro	1.56	6.8

5.3 Modelo de la Dinámica de la Erosión Hídrica en Tlaxcala

En Tlaxcala, las áreas con una cobertura vegetal mayor a 70% (conformada por bosques y zacatonales), el suelo se mantiene protegido contra la erosión hídrica. Una vez que el ecosistema se somete a la eliminación de la cobertura vegetal por cambio de uso para las actividades antrópicas como es el establecimiento de áreas agrícolas, el suelo está potencialmente en riesgo de erosión. Las áreas agrícolas, están por lo tanto, sujetas al impacto de las gotas de lluvia y a la erosión laminar. Sin embargo, este proceso no fue observado durante los recorridos de campo. La Figura 20, muestra un diagrama que une a las diferentes etapas que modelan al proceso de erosión hídrica observado en el Estado de Tlaxcala.

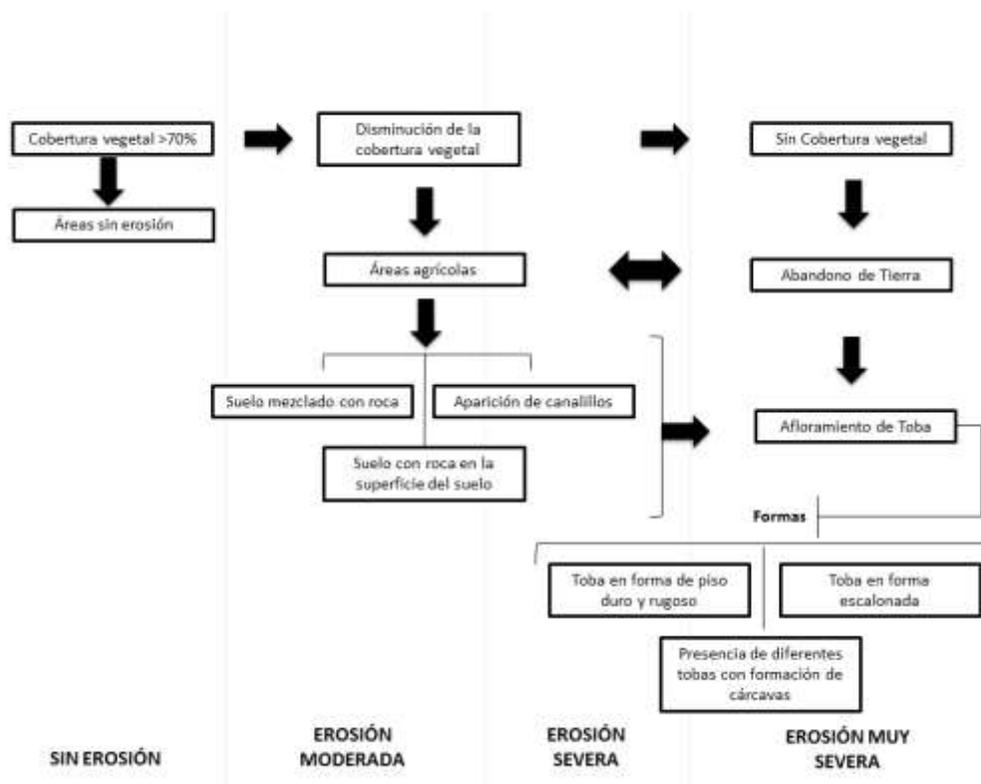


Figura 20. Diagrama esquemático de las clases de erosión hídrica observadas en el Estado de Tlaxcala.

El tipo de erosión, apreciable en campo, fue el correspondiente a la formación de canalillos, los cuales presentan diferentes profundidades de acuerdo con las características de los suelos donde ocurren. Este tipo de erosión la perciben los productores pero no todos dimensionan su gravedad, lo que constituye el comienzo de la pérdida total del suelo. El tiempo, el clima y la topografía determinan la ocurrencia de suelos muy someros, lo que provoca la reducción de su productividad y su posterior abandono. Una vez abandonadas las áreas, la cubierta vegetal esta reduce a menos de 30 por ciento, quedando el remanente de suelo expuesto a procesos erosivos naturales. A medida que se conjuga con la pendiente permite que el agua adquiera diferentes velocidades y con ello su poder destructivo se manifieste en diferentes magnitudes.

En el área de estudio hay dos tipos de erosión hídrica; la primera es la erosión edáfica con la pérdida del suelo y la segunda es la erosión geológica, que afecta a las tobas presentes. La toba amarilla es la más resistente y dura formando pisos rugosos, la toba roja con una dureza intermedia genera formas escalonadas y la toba blanca la más frágil (Figura 21).

Como parte de un análisis integral, la erosión hídrica es el resultado de un desencadenamiento de alteraciones físicas, químicas y biológicas estrechamente asociadas con el clima, la topografía y el material geológico. La evolución secuencial del proceso degradativo inicia con un cambio en la cobertura vegetal forestal para el establecimiento de áreas agrícolas, como se presentó en las facetas de Calpulalpan y Tlaxco. Las áreas agrícolas por su parte mostraron que el proceso de erosión hídrica más evidente son los canalillos; sin embargo, las prácticas de manejo ocultan y aparentemente eliminan esos procesos erosivos presentes durante cada ciclo. Los canalillos transportan materiales en suspensión, en cada ciclo y temporada de lluvias y se incrementa la pérdida de suelo de acuerdo con la forma del terreno, su pendiente y las características del propio suelo.

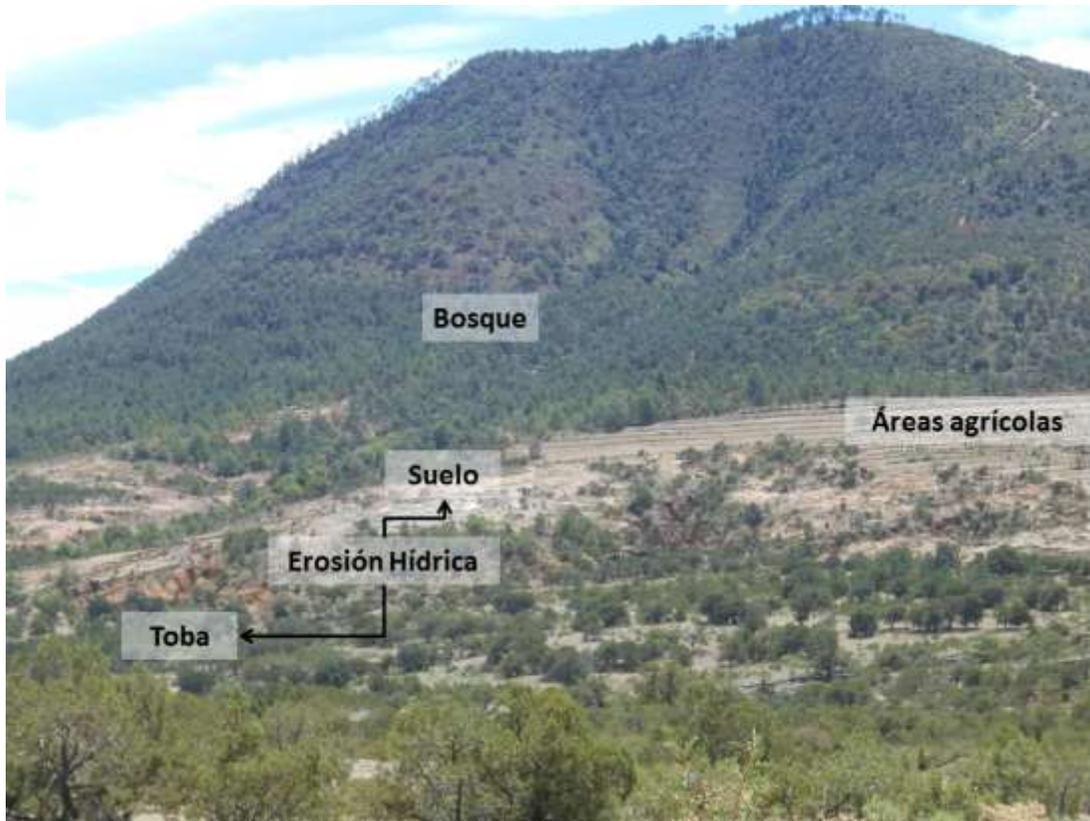


Figura 21. Paisaje con áreas estables, áreas agrícolas y áreas con alto grado de erosión.

Es importante indicar que en suelos con texturas de medias a finas y con altos contenidos de materia orgánica se producían canales menos profundos. Este tipo de erosión hídrica es la más peligrosa porque se tiene la impresión que el productor no la percibe, hasta que el suelo es muy somero. Valentin *et al.* (2005), mencionan que los suelos propensos a la erosión con formación de canalillos son causa de la erosión en cárcavas y no está limitado a terrenos abandonados o montañosos.

Los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades edáficas, se indica que el contenido de materia orgánica de los suelos disminuye en relación con los procesos erosivos. Malhi *et al.* (1994) mencionaron que una de las causas de la disminución o pérdida de la materia orgánica es debido al transporte o escorrentía, lo cual conlleva a relaciones e interacciones complejas como es la estructura,

formación de agregados y puede ser un indicador de la condición del suelo o su proceso degradativo (Brunel y Seguel, 2011; Boix-Fayos *et al.*, 2001).

Asimismo, se encontraron áreas con presencia de fragmentos de roca mezclado con suelo como lo fue en Terrenate, Tlaxco, Calpulalpan y Tetla. La presencia de rocas puede tener efectos negativos como positivos en la producción de sedimentos. Estos efectos ambivalentes están condicionados por la pendiente y el tamaño de los fragmentos de roca. Como consecuencia existe una relación entre la cobertura de vegetación secundaria, el fragmento de roca y la producción de sedimentos. Los fragmentos de roca en la superficie del suelo tienen un efecto negativo en la producción de sedimentos y por lo tanto pueden ser considerados como estabilizadores naturales del suelo (Poesen *et al.*, 1994).

También se pudo apreciar en este estudio que con la pérdida gradual del suelo aflora la toba volcánica, lo cual es muy notorio en áreas agrícolas. Además, se encontró por extensión territorial que las mayores áreas con afloramiento de toba se encuentran en zonas de piedemonte y lomeríos con formas convexas y pendientes entre 15 y 35% y el mayor grado de severidad se presenta en los municipios de Tlaxco y Terrenate. Esto conlleva a una modificación de paisaje donde la pérdida del suelo es irreversible.

Los resultados ponen de manifiesto la presencia de dos tipos de erosión hídrica: la edáfica y la geológica; no obstante, a nivel Estatal no existen estudios relacionados con la erosión hídrica geológica.

En México la distribución de las tobas, conocidas también como tepetates, se encuentran sobre el eje Neovolcánico y relacionadas con zonas climáticas con una pluviometría total anual de 800-900 mm con temporadas de seca bien marcadas (Nimlos, 1990; Zebrowski, 1991).

La toba al exponerse a la intemperie sufre diferentes cambios importantes tales como endurecimiento, influenciado por los carbonatos de calcio o la sílice. Los datos de laboratorio mostraron que no había presencia de carbonatos de

calcio, por lo que puede relacionarse con la sílice que al ser absorbido por la arcilla refuerza el endurecimiento del material al secarse el suelo (Creutzberg *et al.*, 1990). En Tlaxcala se encontró que los procesos de erosión geológica que ocurren en tobas volcánicas pueden superar los 30 m de profundidad.

Los datos mostraron que las tobas presentes corresponden petrográficamente a las clasificadas como tobas cristalinas andesíticas (Toba amarilla) y tobas cristalinas riolíticas (Toba roja). Respecto a las tobas o tepetates, corresponden a depósitos consolidados de cenizas volcánicas y su dureza puede deberse a procesos pedogenéticos que contribuyen a su cementación (Quantin, 1992; Bertaux y Quantin 1994).

Con la información generada se puede diferenciar la existencia de dos tipos de erosión hídrica en el estado de Tlaxcala, la edáfica y la geológica, lo cual es muy relevante debido a que se requiere prestar más atención a la primera y no dar recomendaciones técnicas con la segunda.

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos es posible establecer las siguientes conclusiones:

- Las características geomorfológicas condicionan el grado de severidad de la erosión hídrica del suelo y el tipo de toba presente determina la magnitud de la erosión hídrica geológica. Sin embargo el factor determinante en la pérdida de suelo es la vegetación. Por lo que las prioridades en cuanto a la conservación de suelos deben realizarse antes o cuando los canalillos se presentan sobre el terreno.
- La erosión hídrica del suelo es el resultado de un cambio de uso de forestal al agrícola, y la velocidad está asociada con factores como el material geológico y la topografía. La severidad y magnitud de la erosión sobre el material geológico está particularmente asociado a los depósitos de materiales piroclásticos o tobas distribuidos sobre las franjas volcánicas y en México particularmente sobre Eje Neovolcánico.
- El material geológico determina la severidad del grado de erosión. La toba más fácil a perderse es la toba vítrea riolítica.
- Un mejor conocimiento de la relación del suelo con los factores como el material geológico, clima, vegetación permitirá establecer inversiones y acciones para detener la pérdida de la productividad y detener los procesos de erosión, además permitirá dirigir esfuerzos e intereses focalizados a nivel regional o local.

7. LITERATURA CITADA

- Alcañiz M., J. 2008. Erosión: Evaluación del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo. *In: Andrés, P. y Rodríguez, R. (eds.). Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica. Girona, España p.127-146.*
- Adema E.O., J. Babinec F. y N. Peinemann, 2001. Perdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del Caldenal Pampeano. *Ciencia del Suelo* 19(2): 144-153.
- Alvarado C., M., J.A. Colmeneros R. y Ma. de la L. Valderrábano A. 2007. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. Universidad Autónoma del estado de México. *Ciencia Ergo Sum.* 14(003):317-326.
- Buendía-Rodríguez E., F. Islas-Gutiérrez y V. Guerra-De la Cruz. 2007. Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes Landsat ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, México. *Terra Latinoamericana* 26:1.
- Boix-Fayos C., A. Calvo-Cases., C. Imeson A. and M.D. Soriano-Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44:47-67.
- Bertaux J y P. Quantin. 1994. Relation geometrique et variations mineralogiques des differents termes d'une sequence d'alteration de tufs pyroclastiques de la region de Texcoco (Mexique). *In: 15th World congress of soil science. Acapulco, México. 232-233 pp.*

- Brunel N. y O. Seguel. 2011. Efectos de la erosión en las Propiedades del suelo. *Agro Sur* 39 (1): 1-12. Cairns, I.; Handyside B.; Harris M. and Lambreschtsen N. 2001. Soil conservation technical handbook (en línea). Wellington, Nueva Zelanda. Disponible en <http://www.mfe.govt.nz/publications/land/soil-conservation-handbook-jun01/soil-conserv-handbook-jun01.pdf>
- Cajuste B. L y Ma. del C. Gutiérrez C. 2011. El factor relieve en la distribución de los suelos en México. *In*: Krasilnikov, P.; Jiménez, N. F; Reyna, T.T y García, C.N.E. (Comp.). Geografía de los suelos en México. Universidad Autónoma de México.
- Cairns I., B. Handyside., M. Harris y N. Lambreschtsen 2001. Soil conservation technical handbook (en línea). Wellington, Nueva Zelanda. Disponible en <http://www.mfe.govt.nz/publications/land/soil-conservation-handbook-jun01/soil-conserv-handbook-jun01.pdf>
- Christian C. S. and A. Stewart G. 1968. Methodology of Integrated Surveys. Aerial Surveys and Interpreted Studies. Proc. UNESCO Conf. Principles Methods Integrated Aerial Studies. Nat. Res. Potential Develop, Toulouse. p. 233 – 280.
- Creutzberg D., J. Kauffman H., M. Bridges E. and M. Del Posso. 1990. Micromorphology of "cangahua". A cemented subsurface horizon in soils from Ecuador. *In*: L. A. Douglas (ed). Soil micromorphology: a basic and applied science pp .367-372.
- Espinoza E. H. 1992. Evaluación de la magnitud y riesgo de erosión en el sistema terrestre "Españita", Edo. de Tlaxcala. *In*: Tovar, S.J.L y Quintero R.L (eds).

Memoria del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Acapulco, Guerrero, México. p 387.

Etchevers B., J. D., A. Pérez O., H. Brito V., M Vargas I. y U. López N. 1998. La fertilidad de los tepetates del Eje Neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala. En: Navarro G. H., Poupon H., Pérez O. M. A. (Eds.) 1998. Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP. Montecillo, Méx. p 17-36.

FAO 1993. Erosión de suelos en América Latina. Roma.

FitzPatrick E. A. 1980. Soils: their formation, classification and distribution. New York. 351 pp.

García-Fayos P. 2004. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. In: Valladares, F. Ecología del bosque mediterránea en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. p. 309-334.

García-Chevesich P. 2008. Procesos y control de la erosión. Outskirts Press. Denver, CO. 276 p.

Gómez G.A., S. Schnabel y F. Lavado C. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas, trabajos desarrollados en la Península Ibérica. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. 55:59-80.

Guerra De la C., V y E. Buendia R. 2010. Identificación de suelos erosionados en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala: magnitud y distribución. Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Sitio Experimental Tlaxcala, México. 18 p. (Folleto Técnico Núm. 45).

Heshmati, M., M. Majid N., S. Jusop., M. Gheitury and A. Abdu. 2013. Effects of soils and Rock Mineralogy on soil erosion Features in the Merek Watershed, Iran. *Journal of Geographic Information System*. 5: 248-257.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2009. Carta Fisiografica. Escala 1:250 000. INEGI. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2006. Carta de Edafología, escala 1:000 000. INEGI. México.

Jenny H. 1994. *Factors of soil formation*. 2nd ed. Dover Publ. Inc. New York, N.Y. 190 p.

Leon A., R. 1976. *El Levantamiento Fisiográfico y la Conservación de Suelos*. Tesis de M. en C. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 140 p.

Lal R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. & Develop.* 12:519-539.

López F., R. 2002. *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación ambiental y Territorial. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 273 p.

Malhi S., R. Izaurralde., M. Nyborg., E. Solberg. 1994. Influence of topsoil removal on soil fertility and barley growth. *J. Soil and Water Cons.* 49(1):96:101.

MacMillan R., A. and A. Shary P. 2009. Landforms and landform elements in geomorphometry. *McLauchlan* 2006. In: *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. 33:227-254.

- McLauchlan K. 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review: *Ecosystems* 9(8): 1364-1382.
- Miles y Franzmeier. 1981.
- Morgan R., P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trad. de la 2a ed. en español por P. Urbano Terrón y J. de M. Urbano López de Meneses. Mundi-Prensa. Madrid, España. 343 p.
- Morgan R., P.C. 2005. Soil erosion and conservation. Blackwell Publishing Ltd. 3rd ed. 304 p.
- Nimlos T., J. 1990. Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate. *Soil survey horizons* 30 (3): 72-77.
- Oldeman L., R. 1994. The global extent of land degradation. *In: Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.). Land Resilience and suitable Land Use.* CABI, Wallingford. p.19-36.
- Ortiz-Solorio C. A. y H. E. Cuanalo de la C. 1977. Levantamiento Fisiográfico del Área de Influencia de Chapingo, para la Cartografía de Tierras Erosionadas. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ortiz-Solorio C. A. y H. E. Cuanalo de la C. 1984. Metodología del Levantamiento Fisiográfico. Un sistema de clasificación de tierras. 2a ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 89 p.
- Ortiz-Solorio C.A. 2005. Levantamiento Fisiográfico. Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Ortiz S. C.A., P. Sánchez G., E.V. Gutiérrez C y Ma. del C Gutiérrez C. 2011. El factor clima en la distribución de suelos en México. *In: Krasilnikov, P.;*

- Jiménez, N. F; Reyna, T.T y García, C. N.E. (Comp.). Geografía de los suelos en México. Universidad Autónoma de México.
- Pimentel D. 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. Environment, Development and Sustainability. Springer 8:119-137.
- Poesen J and H. Lavee. 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. Catena 23:1-28.
- Poesen J., J. Nachtergaele., G. Verstraeten and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena 50:91-233.
- Poesen J. W., D. Torri y K. Bunte. 2006. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. Catena 23:141-166.
- Quantin P. 1992. L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: Processus Géologiques et pédologiques. Terra 10:24-33.
- Renard K., G. Foster R., G. Weesies A. y J. Porter, P. 1991. RUSLE Revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation. 46:30-33.
- Schaetzi and Anderson. 2005.
- SEMARNAT-UACH. 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana escala 1: 1000 000. SEMARNAT. México.
- SEMARNAT-CP, 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250 000. Memoria Nacional pp 75.

- Stocking M. y N. Murnaghan. 2003. Evaluación de campo de la Degradación de la Tierra. Ediciones Mundi-Prensa, México. Pp 40-169.
- Van Lynden G., W.J and L. Oldeman R. 1997. The assessment of the status of human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. ISRIC. Wageningen, The Netherlands.1-35 p.
- Valentin C., J. Poesen, y Yong Li. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63:132-153.
- Vega M., B y M. Febles J. 2006. Evaluación de la erosividad de la lluvia en regiones agropecuarias en la porción central de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 40 (2):215-220.
- Young A. 1974. *Tropical Soils and Soil Survey*. Cambridge University Press. London.
- Warren A. 2002. Land degradation is contextual. *Land Degrad. & Develop.* 13 (6):449-459.
- Webster R. and T. Beckett H. 1970. Terrain classification and evaluation using air photography: a review of recent work at Oxford. *Photogrammetria*. 26(2-3): 51-75.
- Werner G. 2012. *Los suelos en el Estado de Tlaxcala. Altiplano Central. Mexicano. Segunda Edición. México DF.*
- Wischmeier W., H., D. Smith D. y E. Uhland R. 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agric. Eng.* 39:458-462.
- Wysocki D., J. Schoeneberger P., D. Hirmas R. and H. LaGarry E. 2009. Geomorphology of soil landscapes. In: P. Huang M., Li Y and M. Sumner E. (eds). *HandBook of Soil Sciences: Properties and Processes*. United States of America. p. 1-26.

- Zapata H., R. 2003. Química de los procesos pedogénéticos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 358 p.
- Zarate-Z R., M. Anaya-G., C.A Ortiz-S, E., Ramírez-G M. 1991. Diagnóstico y control de la degradación de la tierra en el estado de Tlaxcala. *Agrociencia* 2(3):59-81.
- Zarate Z. R y M. Anaya G. 1992. Evaluación y cartografía del riesgo a la degradación del suelo por erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. *Terra* 10:1.
- Zarate-Z R., M. Anaya-G., C. Ortiz-S., y M.E. Ramírez-G. 1991. Diagnóstico y control de la degradación de la tierra en el estado de Tlaxcala. *Agrociencia* 2(3):59-81.
- Zarate Z., R y M. Anaya G. 1992. Evaluación y cartografía del riesgo a la degradación del suelo por erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. *Terra* 10:1.
- Zebrowski C. 1991. Los suelos endurecidos en América Latina. *Terra* 10. Número especial: suelos Volcánicos endurecidos. 15-23 pp.
- Zink J., A., I. López G., P. Metternicht D y L. Vazquez-Selem. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG 3(2001-1):43-53.
- Zink A. 2005. Suelos, información y sociedad. *Gaceta Ecológica*. Julio-Septiembre. 76:7-22.