



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

**Caracterización de la Cobertura Edáfica en la Región Sur de la
Presa Valsequillo, Puebla.**

Tesis presentada para obtener el

Maestría en Ciencias Ambientales

Presenta

Antonio Pacheco Rios

Director de tesis:

Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga

Octubre 2018



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

**CAMBIO ESPACIAL DE LA COBERTURA EDÁFICA EN LA
REGIÓN SUR DE LA PRESA VALSEQUILLO, PUEBLA.**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANTONIO PACHECO RIOS

Comité tutorial:

Director	Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga
Integrante Comité Tutorial	M.C. Sergio Martín Barreiro Zamorano
Integrante Comité Tutorial	Dra. Amparo Mauricio Gutiérrez
Integrante Comité Tutorial	Dra. María Teresa Zayas Pérez
Integrante Comité Tutorial	Dr. Ángel David Flores Domínguez.

Agosto 2018

Dedicatoria

A mi madre

Gracias por todas las etapas de mi vida en la cual has estado siempre presente. Junto contigo he logrado muchas cosas y no hay mejor premio que tu tranquilidad y felicidad. Por esa razón, el logro hoy alcanzado es también tuyo, quiero decirte que siempre hago mi mayor esfuerzo. Gracias por tus consejos y palabras que han guiado mi camino y siempre llevo presente para llevar una vida de responsabilidades y amor.

A mis profesores

Gracias por darme las armas para enfrentar a la vida y mejorar al país por que la investigación sea forja a través del desarrollo profesional y personal del investigador, pero es una contribución para el país.

A mis amigos de mi Generación.

Gracias porque siempre estuvieron pendientes de mi día con día y me dieron su apoyo cuando lo necesite sin pedirme nada a cambio. Ustedes me acompañaron a lo largo de este proceso estuvieron pendientes de que todas las cosas me salieran bien y de que no tomara una mala decisión, les agradezco la confianza que depositaron en mi para poder estar siempre en las buenas y las malas juntos. Gracias por confiar y creer en mí y haber hecho esta etapa un trayecto de vivencia que nunca voy a olvidar.

Agradecimientos

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla recinto invaluable que me permitió enfrentarme a la realidad con responsabilidad y nacionalismo.

Al Instituto de Ciencias Universitarias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y en especial al Posgrado en Ciencias Ambientales por darme la oportunidad y la confianza para la elaboración de este trabajo de investigación, y abordar los problemas ambientales desde una actitud crítica y propositiva con una visión integral para contribuir al manejo y conservación de los recursos naturales del país.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por haber financiado mis estudios de maestría.

Al Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga por el apoyo y diseño del presente trabajo.

Al honorable Comité tutorial por sus valiosas aportaciones a este trabajo de investigación.

Al Cuerpo Académico del Posgrado en Ciencias Ambientales y del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla de quienes siempre he contado con su apoyo incondicional.

A los doctores, maestros y amigos del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas DICA, con quien es he compartido buena parte de mi formación académica.

A mis amigos y compañeros de la maestría en Ciencias Ambientales muchas gracias por sus consejos y compañía, quienes con su ejemplo me enseñaron a ser una mejor persona en el aspecto personal, profesional y académico. En especial a María Fernanda González por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

CAPITULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	1
1.1.- Introducción.	1
1.2.- Justificación.	2
1.3.- Pregunta de investigación.	2
1.4.- Objetivos.	2
1.4.1.- Objetivo general.	2
1.4.2.- Objetivos particulares.	2
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA.	3
2.1.- Metodologías para evaluar la degradación de los suelos.	3
2.1.1.- Metodología cuantitativa.	3
2.1.1.1.- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).	3
2.1.1.2.- Metodología FAO -1979.	4
2.1.2.- Metodología cualitativa.	6
2.1.2.1.- Estudio de degradación del suelo causada por el hombre a nivel mundial. GLASOD-1990.	6
2.1.2.2.- Estudio de degradación de suelo causada por el hombre en México – 2002.	6
2.1.2.3.- Línea Base Nacional de Degradación de tierras y desertificación – 2013.	7
2.1.2.4.- Degradación hídrica INEGI- 2015.	8
2.1.2.5.- Evaluación de la degradación de suelo erosionados: métodos e índices de diagnóstico.	8
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.	12
3.1.- El suelo.	12

3.2.- Cobertura edáfica.	15
3.3.- Cambios de la cobertura edáfica.	16
3.4.- Degradación de suelo.	17
3.5.- Mapeo de la erosión del suelo.	19
3.6.- Teledetección satelital de la erosión del suelo.	21
3.7.- Características espectrales de suelos erosionados.	21
3.8.- Técnicas de clasificación.	22
3.9.- Índices de vegetación para el mapeo de la erosión del suelo.	22

CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. 24

4.1.- Delimitación del área de estudio.	24
4.2.- Suelos.	25
4.3.- Vegetación y uso de suelo.	26
4.4.- Geología.	29
4.5.- Fisiografía.	30
4.6.- Clima.	30
4.7.- Hidrología.	32
4.8.- Caracterización socioeconómica.	33
4.8.1.- Situación socioeconómica a nivel nacional, estatal y municipal.	33
4.8.2.- Población.	35
4.8.3.- Vivienda.	36
4.8.4.- Educación.	36
4.8.5.- Salud.	38

CAPITULO V. METODOLOGÍA. 39

5.1.- I. Fase de Exploración.	39
5.1.1- Recopilación y análisis de la información.	39
5.1.2.- Corrección atmosférica.	41
5.1.3.- Métodos de clasificación de imágenes satelitales.	41

5.1.3.1.- Clasificación no supervisada.	41
5.1.3.2.- Clasificación supervisada.	42
5.1.4.- Índices de vegetación para el mapeo de la erosión del suelo.	43
5.2.- II. Fase de Campo.	45
5.2.1.- Descripción de las condiciones del entorno.	45
5.2.1.1.- Relieve	47
5.2.1.2.- Material parental	47
5.2.1.3.- Vegetación y uso de suelo	48
5.2.1.4.- Consideraciones sobre la influencia humana en el entorno	48
5.2.1.5.- Drenaje externo	49
5.2.1.6.- Grado de erosión	50
5.2.1.7.- Afloramientos rocosos	51
5.2.1.8.- Drenaje interno	51
5.3.- III. Fase de Integración.	52
5.3.1.- Clasificación y distribución de las coberturas edáficas.	52
5.3.2.- Propuestas de uso y manejo sustentables establecidas en este trabajo.	52
5.3.4.1.- Practicas agrotécnicas o vegetativas.	53
5.3.4.2.- Manejo de coberturas con el uso del abonado verde.	53
5.3.4.3.- Practicas mecánicas	53
5.4.- Análisis estadísticos.	54
5.4.1.- Análisis de varianza (ANOVA)	54
5.4.2.- Prueba Chi cuadrada.	55
CAPITULO VI. RESULTADOS.	56
6.1.- Fase I. Exploración.	56
6.1.1.- Corrección atmosférica.	56
6.1.2.- Clasificación de la imagen satelital.	57
6.1.3.- Índice de vegetación normalizada (NDVI).	60
6.1.4.- Porcentaje de cobertura vegetal (FVC).	62
6.1.4.1.-Análisis de varianza	66

6.2.- Fase II. Campo.	69
6.2.1.- Características de los contornos.	69
6.2.2.- Características de las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla.	78
6.2.2.1.- Cobertura edáfica ligeramente degradada.	78
6.2.2.2.- Cobertura edáfica moderadamente degradada.	80
6.2.2.3.- Cobertura edáfica fuertemente degradada.	81
6.2.2.4.- Cobertura edáfica severamente degradada.	83
6.2.2.5.- Cobertura edáfica muy severamente degradada.	86
6.3.- Fase III. Integración.	91
6.3.1.- Clasificación y distribución de las coberturas edáficas.	91
6.3.2.- Propuesta de manejo y conservación de las coberturas edáficas.	93
6.3.4.1.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica ligeramente degradada.	94
6.3.4.2.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica moderadamente degradada.	95
6.3.4.3.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica fuertemente degradada.	96
6.3.4.4.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica severamente degradada.	97
6.3.4.5.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica muy severamente degradada.	98
6.4.- Análisis estadísticos	98
CAPITULO VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	100
CONCLUSIONES.	107
RECOMENDACIONES.	108
BIBLIOGRAFÍA.	108

Contenido Figuras

Figura 1. Perfil general de un suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas. Fuente. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2017).	13
Figura 2. Localización de la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia, a partir de los conjuntos de datos vectoriales de INEGI (2010).	24
Figura 3. Climograma estación “Balcón del Diablo” (1951–2010). Fuente. Elaboración propia con base a las Normales Climatológicas (SMN).	31
Figura 4. Imagen satelital corregida atmosféricamente, el polígono rojo delimita el área de estudio. Fuente. Elaboración propia.	56
Figura 5. Resultado de la clasificación no supervisada. Fuente. Elaboración propia.	59
Figura 6. Distribución espacial del NDVI.	62
Figura 7. Distribución del porcentaje de cobertura vegetal en cada cobertura edáfica.	65
Figura 8. Frecuencias FVC, la línea negra muestra la curva normalidad.	67
Figura 9. Mapa de contornos. Fuente elaboración propia.	69
Figura 10. Distribución de las coberturas edáficas. Fuente. Elaboración propia.	93
Figura 11. Cálculo de las superficies de Las coberturas edáficas en los diferentes contornos. Fuente. Elaboración propia.	104

Contenido Tablas

Tabla 1. Factores e índices de degradación de suelos propuestos por FAO (1979) para su cartografía a escalas pequeñas.	5
Tabla 2. Clases de erosión.	6
Tabla 3. Evaluación de las pérdidas de suelo por erosión en Cuba.	9
Tabla 4. Estaciones pluviométricas alrededor del área de estudio.	31
Tabla 5. Distribución de la población.	34
Tabla 6. Distribución de la población según su edad y sexo.	35
Tabla 7. Distribución de la población ocupada por localidad según sexo.	35
Tabla 8. Indicadores de carencia de vivienda.	36
Tabla 9. Distribución de la población.	37
Tabla 10. Población sin derechos a servicios a salud.	38

Tabla 11. Descripción de los materiales cartográficos.	40
Tabla 12. Landsat 8 OLI resolución espacial y espectral. Bandas 1 - 5 y 7 son frecuentemente utilizadas para el mapeo digital de suelos.....	40
Tabla 13. Clasificación de las clases e intensidades de erosión con respecto al porcentaje de cubierta vegetal.....	45
Tabla 14. Clasificación de los grados de erosión.....	50
Tabla 15. Resultados de la clasificación no supervisada.	58
Tabla 16. Estadística descriptiva del NDVI.....	61
Tabla 17. Estadística descriptiva del FVC en cada cobertura edáfica.	63
Tabla 18. Test de la prueba de normalidad.	67
Tabla 19. Estadístico de Levene para homogeneidad de varianzas.....	68
Tabla 20. ANOVA.....	68
Tabla 21. Integración de los resultados de la Fase II de trabajo de campo.	91
Tabla 22. Perdida de los horizontes del suelo en cada una de las diferentes coberturas edáficas. 91	
Tabla 23. Tabulación cruzada para el contorno y cobertura edáfica.	99
Tabla 24. Prueba de chi cuadrada.	99
Tabla 25. Calculo de áreas de las coberturas edáficas en los tres contornos.....	104

Contenido de Imagen

Imagen 1. <i>Quercus liebmanni</i> (Encino prieto).....	27
Imagen 2. <i>Yucca periculosa</i> (Yuca).	28
Imagen 3. <i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i> (Agave pulquero).	28
Imagen 4. <i>Brahea dulcis</i> (Palma dulce).....	28
Imagen 5. Relieve ondulado características del Contorno I.	70
Imagen 6. Cobertura edáfica fuertemente degradada con signos severos de erosión, afloramiento del horizonte B.....	71
Imagen 7. Cobertura edáfica fuertemente degradada con cultivo de maíz.....	71
Imagen 8. <i>Yucca periculosa</i> (Yuca) y <i>Brahea dulcis</i> (Palma dulce).	72
Imagen 9. Relieve ondulado del contorno I, los suelos erosionados se pueden recuperar con lentitud, si se mantiene una cobertura vegetal de pasto bajo durante varias décadas.	72
Imagen 10. Relieve del Contorno II.....	73
Imagen 11. <i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i> (Agave pulquero).	74
Imagen 12. <i>Larrea tridentata</i> (Jarilla)	74
Imagen 13. La deforestación y el cultivo en pendiente constituyen la principal causa de la erosión, cobertura edáfica severamente degradada en el contorno II.....	75
Imagen 14. Paisaje característico del contomo III	75

Imagen 15. Erosión laminar, la capa superficial del suelo fue arrastrada, dejando al descubierto las raíces que finalmente morirán por desecación.....	76
Imagen 16. <i>Yuca periculosa</i> (Yuca) y <i>Agave salmiana var. ferox</i> (Agave pulquero).....	77
Imagen 17. Cultivo de maíz en el contorno III.	78
Imagen 18. Cobertura edáfica ligeramente degradada.	79
Imagen 19. Cobertura edáfica moderadamente degradada en el contorno I.....	80
Imagen 20. Cobertura edáfica fuertemente degradada con cultivos de maíz.	81
Imagen 21. Cobertura edáfica fuertemente degradada, en el contorno II.....	82
Imagen 22. Cobertura edáfica fuertemente degradada.....	83
Imagen 23. Paisaje característico de una cobertura edáfica severamente degradada.	84
Imagen 24. Erosión en cárcavas, la devastación que se ilustra es consecuencia de la eliminación de la vegetación y el efecto de las aguas de escurrimiento.....	85
Imagen 25. Cobertura edáfica severamente degradada.	85
Imagen 26. Cobertura edáfica muy severamente degradada en el contorno I.....	86
Imagen 27. Cobertura edáfica muy severamente degradada en el Contorno II.....	87
Imagen 28. Cobertura edáfica severamente degradada en el contorno II.	88
Imagen 29. Vegetación crece dentro de la cárcava.	88
Imagen 30. Cobertura edáfica dispuesta en islotes.	89
Imagen 31. Vegetación aislada de espinos (<i>Acacia farnesiana</i>) y nopales (<i>Opuntia ficus</i>).....	89
Imagen 32. Cobertura edáfica muy severamente en el contorno III.	90
Imagen 33. Movimiento en masa, se propone la siembra en contorno de <i>Vetiveria zizanioides</i>	97
Imagen 34. Agave ayuda a controlar la erosión en cárcavas, cobertura edáfica muy severamente degradada, contorno I.	98

CAPITULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.1.- Introducción.

Los suelos son fundamentales para garantizar la prestación de una variedad de servicios ecosistémicos, conocidos como: "Los beneficios que las personas obtienen de los suelos" (Dominati *et al.*, 2010). La capacidad de los suelos para proporcionar bienes y servicios se confiere a los procesos biogeoquímicos que ocurren en el suelo y a la riqueza y funcionalidad de la biodiversidad del suelo (Smith *et al.*, 2015). La biodiversidad del suelo proporciona servicios valiosos para la producción agrícola a través del ciclo de nutrientes, donde una relación simbiótica entre las comunidades vegetales y los microorganismos son esenciales para mantener las funciones ecosistémicas (MEA, 2005). Los suelos sanos son la base de la agricultura y un recurso esencial para garantizar las necesidades humanas en el siglo XXI, como comida, fibra, agua y aire limpio (Keesstra *et al.*, 2016). En este contexto, México es un país megadiverso y los suelos no son la excepción, tan solo en nuestro país se encuentran 28 de los 32 tipos de suelos reconocidos por la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2015), esto favorece la práctica de diferentes tipos de sistemas agrícolas y la obtención de una amplia gama de bienes y servicios (INEGI, 2015a). Sin embargo, las actividades humanas y los cambios en el uso de la tierra han conducido a la degradación del suelo (Borrelli *et al.*, 2017), y a su vez a la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos claves tanto ecológicos como económicos, sociales y culturales, que son fundamental para la vida en el planeta (Comisión de las Comunidades Europeas, 2002). Por esta razón, es crucial tener información espacial y temporal actualizada acerca de la degradación del suelo para la planificación de programas de conservación y rehabilitación del suelo Seutloali, K.E., Dube, T., Mutanga, O. (2016). Esta investigación se realizó con el objetivo de caracterizar las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla para determinar la magnitud, intensidad y distribución espacial de los procesos y niveles de erosión del suelo a partir del procesamiento e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 Operation Land Imager (OLI) y la descripción de los indicadores de erosión como: la profundidad del suelo, afloramientos rocosos, porcentaje de rocas, piedras y gravas en la superficie, entre otros, y los factores ambientales que condicionan la erosión del suelo tales como: el clima, el relieve, las propiedades del suelo, la vegetación y el uso del suelo, con el objetivo de implementar medidas de uso y manejo, conservación, protección y restauración del suelo.

1.2.- Justificación.

La región sur de la presa de Valsequillo es un área que presenta una degradación ambiental, los recursos naturales están en un proceso de deterioro y la población presenta altos niveles de marginación, en este trabajo de investigación se hizo con el objetivo de conocer el grado de deterioro que presentan los suelos, su magnitud y extensión y que sirva para realizar campañas de conservación, protección y restauración de suelos en la región sur de la presa de Valsequillo.

1.3.- Pregunta de investigación.

¿Qué indicadores de erosión pueden ser utilizados para caracterizar la cobertura edáfica a partir del procesamiento e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 OLI y la descripción de los factores ambientales que condicionan la erosión del suelo en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla?

1.4.- Objetivos.

1.4.1.- Objetivo general.

El objetivo principal de este estudio es caracterizar las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla, a través del procesamiento e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 OLI y la descripción de los indicadores y factores ambientales que condicionan la erosión, para la propuesta de medidas de uso y manejo, conservación, protección y restauración del suelo.

1.4.2.- Objetivos particulares.

- Establecer los indicadores de erosión que permitan la caracterización de la cobertura edáfica a través del procesamiento e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 OLI y la descripción de los factores ambientales que condicionan la erosión del suelo.
- Clasificar las coberturas edáficas de acuerdo con los indicadores y factores ambientales que condicionan la erosión del suelo.
- Determinar la magnitud, intensidad y distribución de las coberturas edáficas a partir de la representación espacial de los niveles de erosión, para proponer medidas de uso y manejo, conservación, protección y restauración del suelo.

CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA.

2.1.- Metodologías para evaluar la degradación de los suelos.

En la evaluación del suelo hay dos metodologías de acuerdo con el tipo de investigación (Krasilnikov *et al.*, 2011). La primera metodología es la cuantitativa que se enfoca a la evaluación de las pérdidas del suelo en un punto determinado (en campo, en un parte de la ladera, o a veces en una cuenca en particular); los métodos que se utilizan son diversos desde simulación de lluvias hasta el monitoreo continuo y el uso de marcadores radiactivos, los resultados de estos estudios son muy precisos, pero difíciles de extrapolar a escalas mayores. Por el contrario, la segunda metodología es la cualitativa la cual está enfocada a la distribución espacial de los procesos de erosión y los suelos erosionados.

2.1.1.- Metodología cuantitativa.

2.1.1.1.- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

A partir de 1949, en los Estados Unidos de América se iniciaron investigaciones para desarrollar un procedimiento cuantitativo, con el objetivo de estimar la pérdida de suelo en la franja maicera. En las primeras ecuaciones se consideraban la pendiente y las prácticas de conservación; después se introdujo el factor lluvia, y en 1954 se creó en la Universidad de Purdue el Centro Nacional de Datos de Pérdida de Suelo y Escorrentía. Wischmeier *et al.*, (1958) evaluaron los factores de la ecuación de pérdida de suelo y propusieron la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, también conocida como USLE, por sus siglas en inglés. Este modelo fue publicado en el Handbook Núm. 537 (Wischmeier y Smith, 1978). La USLE es útil para calcular la erosión laminar y en surcos; se le considera como un método paramétrico o modelo multiplicativo, y tiene la siguiente forma (Wischmeier y Smith, 1978):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Donde A representa el valor promedio de las pérdida de suelo anual (tonelada (t) x hectarea (ha)⁻¹ x año⁻¹) en función del índice de erosividad de la lluvia R (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), la erodabilidad del suelo K (t ha⁻¹ año⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹), un factor de relieve donde L es el factor de longitud de pendiente (adimensional) y S es el factor de grado de inclinación de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo de cobertura (adimensional) y un factor de prácticas de conservación de suelos P (adimensional) (Wischmeier y Smith, 1978).

2.1.1.2.- Metodología FAO -1979.

En 1972, en Estocolmo se realizó la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente Humano, donde se reconoció que el deterioro de los recursos naturales renovables estaba ocurriendo a nivel mundial. Es por esta razón que la FAO, con la colaboración del Programa de Naciones para el Medio Ambiente (PNUMA), organizó una consulta de expertos sobre la degradación de suelos celebrada en Roma en 1974. En esta reunión intervinieron miembros de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS). A partir de dicha consulta la FAO, la UNEPO y la UNESCO, a finales de 1975, iniciaron el proyecto “Evaluación Mundial de la Degradación del Suelo” en su primera fase. Los objetivos fueron:

- Evaluar la degradación actual y potencial de los suelos, basada en la compilación de datos existentes y la interpretación de factores ambientales que influyen en su intensidad y extensión.
- Desarrollar una metodología y seleccionar criterios uniformes para medir y monitorear la degradación de los suelos.

En 1979, se publicó “Una Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación” cuyo objetivo era proporcionar una guía para evaluar no solamente los daños ocurridos a la tierra (degradación actual), si no también lo que pudiera ocurrir en el futuro (riesgo de degradación). Los principios en los cuales trabajaron fueron:

- Enfatizar la importancia de la agresividad climática y la resistencia natural de las tierras a la degradación, así como la acción del hombre para incrementar o disminuir riesgos.
- Asumir que el riesgo de evaluación es más útil si los factores inestables son eliminados, como la vegetación natural; además no se consideró el uso de manejo de las tierras pues se asumió como estándar.

Los procesos de degradación que se estudiaron fueron:

- a) **Erosión hídrica.** Incluye los procesos de impacto de la gota de lluvia, erosión laminar, cárcavas y varios movimientos de masas, tales como deslizamientos, avalanchas y solifluxión.

- b) **Erosión eólica.** Entendida como la remoción y deposición de las partículas del suelo por la acción del viento y su efecto abrasivo.
- c) **Salinidad y sodicidad.** Proceso de acumulación de sales y sales sódicas.
- d) **Degradación química.** Involucra los procesos de lixiviación de bases intercambiables del suelo, nutrientes y materiales tóxicos.
- e) **Degradación física.** Se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo como porosidad, permeabilidad, densidad aparente y estabilidad de la estructura.
- f) **Degradación biológica.** Cuando ocurre un incremento en la mineralización del humus.

Para obtener datos de las variables y elaborar mapas de degradación de suelos a escala entre 1:000,000 a 1:5000,000, la FAO propuso varios factores e índices, los cuales reporta en forma resumida en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Factores e índices de degradación de suelos propuestos por FAO (1979) para su cartografía a escalas pequeñas.

Factor	Clima	Suelo	Topografía	Humano
Índice de degradación (FAO, 1979)	Índice de agresividad de las lluvias.	Nomograma de Wischmeier a partir de la Materia Orgánica, estructura, permeabilidad y textura, o los valores para unidades del mapa mundial de suelos para sus texturas.	Clases de pendientes reportadas en el mapa mundial de suelos.	Terrenos agrícolas y vegetación natural.

Fuente. FAO, 1979.

El primer mapa nacional de erosión hídrica realizado por técnicos mexicanos fue elaborado por Estrada-Berg y Ortiz (1982), quienes aplicaron un procedimiento paramétrico para generar el plano de áreas con erosión hídrica en México, cuyo modelo estaba descrito en la publicación “*Una Metodología para la Evaluación de Suelos*” (FAO-UNEP-UNESCO, 1979).

El mapa de erosión hídrica del suelo en México se presentó a escala 1:8,000,000. Este mapa se realizó con un procedimiento exclusivo de gabinete y con el interés de académicos de conocer la metodología. De tal forma, su calidad está en función de los materiales empleados, recursos y material capacitado. Sin embargo, se detectó que la metodología requería de ajustes y adaptaciones. Se reportó que 98 % del país estaba afectado por erosión hídrica en sus diferentes grados: erosión ligera 36.4 %; erosión moderada 34.3 %; erosión alta 20.5 % y erosión muy alta 8.6 %. Las clases de erosión hídrica utilizadas para su mapeo fueron las siguientes (**Tabla 2**).

Tabla 2. Clases de erosión.

Clase	Rango de erosión (toneladas por hectárea al año)
Nula a ligera	< 10
Moderada	10 - 50
Alta	50 - 200
Muy alta	> 200

Fuente. FAO (1979).

2.1.2.- Metodología cualitativa.

2.1.2.1.- Estudio de Degradación del Suelo Causada por el Hombre a Nivel Mundial. GLASOD-1990.

La metodología para la evaluación mundial de la degradación del suelo causada por el hombre, conocida como GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation) bajo el liderazgo de Oldeman L. R. en 1988, puso de manifiesto el grave estado de degradación en el que se encontraban los suelos a nivel mundial. La elaboración del mapa y las tablas de las matrices de datos para México fueron responsabilidad directa de Ortiz Solorio C. A. y Gonzales Meraz J. (Oldeman, Hakkeling y Sombroek, 1990). En este primer mapa resultó que el proceso de degradación más significativo fue la erosión hídrica, la cual afecta aproximadamente 1093.7 millones de ha, es decir, 55.6 % de la superficie terrestre; la erosión eólica 548.3 millones de ha, es decir, 27.9 %; la degradación química 239.1 millones de ha (12.2 %) y física 83 millones de ha (4.2 %), cada proceso con diferentes intensidades (Oldeman, Hakkeling y Sombroek, 1991). Cabe añadir que los datos de GLASOD se basan en estimaciones cualitativas y solo proporcionan una primera aproximación del estado global de la degradación de los suelos.

2.1.2.2.- Estudio de Degradación de Suelo Causada por el Hombre en México – 2002.

La evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000, elaborada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Colegio de Posgraduados (CP) en 2003, se basó en la metodología de Evaluación de la Degradación del Suelo causada por el Hombre, conocida como ASSOD (The Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation in South and Southeast Asia), propuesta por Van Lynden y Oldeman en 1997, la cual es una modificación de la conocida GLASOD (Oldeman, 1998). Los resultados mostraron que México para el 2002 presentaba suelos degradados por la

acción humana en el 44.9 % de su territorio, mientras que, el 55.1 % restante no mostraba indicios de degradación aparente. Los resultados mostraron que el principal proceso degradativo a nivel nacional era la degradación química 17.8 % (34.04 millones de hectáreas del país), seguida por la erosión hídrica 11.9 % (22.72 millones de ha), eólica 9.5 % (18.12 millones de ha) y en menor proporción le correspondía a la degradación física con 5.7 % (10.84 millones de ha).

Los principales factores causativos de la degradación de los suelos fueron:

- a) Actividades agrícolas en 39 %
- b) Sobrepastoreo 38 %
- c) Deforestación 16 %
- d) Urbanización 4 %

Los factores causativos de menor impacto fueron: la sobre explotación de la vegetación para consumo humano con 2 % y las actividades industriales con 1 %. En este estudio también se mencionó que los niveles de degradación extrema de los suelos se relacionan con el crecimiento urbano. Por ejemplo, a nivel estatal las entidades con mayor degradación de los suelos fueron: Tlaxcala con 74 % de su territorio, Yucatán 71 %, Tabasco 70 %. En cuanto a los estados menos afectados se encuentran: Coahuila con 21 %, Baja California Norte 7 % y Baja California Sur 5 %.

2.1.2.3.- Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación – 2013.

La CONAFOR en colaboración con la Universidad de Chapingo en 2013 mostro a partir de la “Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación” que el 90.7 % de la superficie nacional presentaba algún tipo de degradación de tierras (177.64 millones de ha) por causas naturales y/o antrópicas. El 24.21 % (47.43 millones de ha) presenta una degradación ligera, el 27.2 % (53.291 millones de ha) degradación moderada, el 10.01 % (19.612 millones ha) degradación severa y el 1.59 % (3.115 millones de ha) degradación extrema. Los resultados de este estudio mostraron que la erosión hídrica es la forma más extendida de degradación del suelo, con grados que van de ligeros a extremos y comprenden el 63.02 % del total nacional (111.472 millones de ha).

En Puebla, el 70 % de los suelos presentan problemas de degradación en niveles que van de ligeros a extremos, el 18 % corresponde a terrenos desérticos, rocosos, zonas abandonadas o improductivas, y tan solo 12 % del territorio poblano, cuenta con suelo que mantiene actividades productivas sustentables o sin degradación aparente (CONAFOR y Chapingo, 2013). Por lo cual, es urgente que todas las dependencias involucradas realicen acciones conjuntas para la protección de los suelos.

2.1.2.4.- Degradación hídrica INEGI- 2015.

De los estudios más recientes que evalúan el proceso de degradación por erosión hídrica en la República Mexicana, está el realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), mediante el uso de técnicas de fotointerpretación de imágenes satelitales y puntos de verificación en campo. Este estudio mostró que cerca de 52.86 % de la superficie nacional está afectada por erosión hídrica (INEGI, 2014), aunque posteriormente, el mismo INEGI en 2015 reportó que el 66 % de la superficie nacional está afectado por erosión hídrica (2015a). En conclusión, mediante el uso de diversas metodologías, diferentes escalas de trabajo y con variación temporal, varios autores reportan datos disimiles que, aunque elevados sobre la afectación de la erosión del suelo fluctúan entre 45 y 98 % del país. Además, otros autores estiman que durante los últimos 40 años se ha perdido más suelo que en los últimos cuatro siglos.

2.1.2.5.- Evaluación de la degradación de suelo erosionados: métodos e índices de diagnóstico.

La utilización de nomenclaturas y técnicas de mediciones diferentes, han generado problemas de comparación (Vega y Febles, 2011) y son frecuentes las estimaciones de pérdidas disimiles del estado de erosión del suelo (Febles, 1985).

Durante la década de los años 70 cobro relativamente importancia el método “Geográfico – Comparativo” (Riverol, 1985). Este método de mapificación de suelos erosionados, mejora en alto grado el propuesto por Belobrov *et al.*, (1979). El método se desarrolló tomando como base el Mapa Genético de Suelos de Cuba a escala 1: 250,000 (Instituto de Suelos, 1971) y, utilizando en calidad de patrones, perfiles considerados típicos de cada agrupamiento para establecer los grados de erosión, cabe resaltar que en la confección de estos mapas no se utilizaron las fotografías aéreas

como medio auxiliar, y la diferencia en la aplicación estuvo dada por los índices utilizados en la comparación de los “perfiles patrón”.

A partir de lo anterior, muchos investigadores aplicaron este método, Por ejemplo, Lareshin y Golovehenko (1974); DGFS (1981); MINIAGRI (1982); Riverol (1985) y Soca (1987), tomaron como índices fundamentales la profundidad relativa de los horizontes genéticos A y B. Hernández, Herrera, Iznaga y Tatevosian (1980) y Ascanio, Riverol y Pérez (1983), investigaron acerca de la erosión de los suelos pardos con carbonatos de Cuba, utilizando como índices, la profundidad relativa de los horizontes A y B, contenido de materia orgánica y lavado de los horizontes en los perfiles patrón. Pérez, Durán, Portuondo y Lemus (1984), empleo este último enfoque, pero en el contexto de una topo secuencia. Shepashenko, Riverol y Hernández (1982); Shepashenko, Riverol y Calzada (1984); Riverol (1989); Riverol y Shepashenko (1989), emplearon los indicadores de profundidad, composición mecánica, estructura, contenido de humus, composición del complejo adsorbente, entre otros. Para realizar una evaluación cuantitativa que permitiera determinar la resistencia anti erosiva de los principales suelos de Cuba, evaluando cada tipo de suelo mediante una escala de 0-100 puntos (Vega y Febles, 2011). Es de significar, que los métodos e indicadores seleccionados por el instituto de suelos de Cuba (MINAGRI,1982), para determinar el grado de erodabilidad, sobredimensionaron la profundidad del suelo como índice diagnostico fundamental (Febles, Vega, Bóveda y Jerez, 2007), y establecieron categorías de erosión a partir de una muy somera clasificación de Soil Survey (1951) a las condiciones edafoclimáticas de Cuba (Sibello, 2013), como evidencia en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Evaluación de las pérdidas de suelo por erosión en Cuba.

Grado de erosión	Pérdida de los horizontes del suelo
Erosión muy leve o nula	Pérdida del horizonte A en un 25 %.
Erosión moderada	Pérdida del horizonte A entre un 25-75 %.
Erosión severa	Pérdida del horizonte A en un 75 % y hasta un 25 % del horizonte B.
Erosión muy severa	Pérdidas del horizonte B entre un 25-75%.

Fuente. MINAGRI (1982).

Posteriormente tomando en cuenta la “Evaluación de las Pérdidas de Suelo por Erosión en Cuba”, Ruiz, Calderón, Tamaríz (1999) implementaron la evaluación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica en la Sierra Norte del estado de Puebla, a través de la elaboración del “Manual de

Descripción de Perfiles de Suelo y Evaluación del Entorno” y la publicación del libro “Manejo y Conservación de los Suelos en Minifundios de la Sierra Norte de Puebla” en el año 2004.

Desde hace décadas investigadores del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (ICUAP) han realizado diversos estudios para la conservación de los suelos en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla en donde principalmente se han dedicado a proponer medidas para el manejo sustentable de tierras como, practicas hidrotécnicas, agrotécnicas, vegetativas y medidas mejorativas, y control de la erosión. Dentro de estas investigaciones se publicó el trabajo titulado “Programa Estratégico de Desarrollo Regional Sustentable, para el Manejo y Conservación de los Ecosistemas que Permitan Garantizar la Soberanía Alimentaria y Disminución de la Pobreza”, este trabajo consideró los factores que han favorecido la erosión acelerada, los cuales se deben a la acción conjunta de factores naturales y antropogénicos; el relieve con predominio de áreas onduladas y alomadas, la erosividad de la lluvia, la eliminación de la cobertura vegetal, los cambios en el uso de suelo, los altos niveles de marginación de la población, y la inequidad social. Esta última expresada por la carencia de servicios básicos como disponibilidad de agua, drenaje, servicio sanitario, electricidad y la inaccesibilidad a servicios educativos y de salud, lo cual repercute en los ingresos percibidos por la población y en consecuencia en su bienestar. Este megaproyecto fue financiado por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el cual contemplo el estado de la degradación de los suelos, y concluyó que el 90.91 % de la superficie total del municipio (25421.41 ha), presentaba altos niveles de erosión que va en niveles de fuerte a muy severos. Además, se afirmó que el factor más importante que ha incidido en el municipio de Tzicatlacoyan es la actividad humana, la cual ha provocado la degradación y la eliminación de la cobertura vegetal, y que en condiciones topográficas desfavorables ha provocado la erosión acelerada del suelo.

Durante ese tiempo y con la participación del Posgrado en Ciencias Ambientales de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se han realizado varias investigaciones en diferentes áreas de la región sur de la presa de Valsequillo, en particular en el municipio de Tzicatlacoyan en donde se han desarrollado una cantidad importante de trabajos para áreas específicas de estudio, las cuales han constituido principalmente tesis de estudiantes, tanto en grado de maestría y doctorado, tal es el caso del trabajo de tesis de maestría desarrollado por García (2016), en el cual diagnosticó el

nivel de deterioro de los suelos y su impacto sobre las pérdidas de reservas orgánicas y propuso una alternativa para transitar hacia el desarrollo sustentable en la comunidad de San Bernardino Tepenene. Otros estudios relacionados con esta temática son: el trabajo de Arroyo (2017), en el cual determinó la influencia de los procesos erosivos sobre las características y propiedades de los suelos presentes en la región sur de la presa de Valsequillo y su impacto sobre las condiciones socioeconómicas de las localidades de San José Tejaluca y Los Ángeles Tetela, y el trabajo de investigación de tesis de maestría de Silva (2017), en el cual propuso un conjunto de variables edáficas para ser utilizadas como indicadores para la detección temprana de procesos erosivos y de la desertificación al sur del municipio de Puebla, por lo que selecciono los indicadores edáficos relacionados a composición, estructura y distribución de la vegetación, factores edáficos y geomorfológicos y el uso actual del suelo con base a la correlación de los datos según tipo e intensidad de degradación del suelo con los tipos de uso actual de la tierra que permitieran la caracterización de los cambios de la cobertura edáfica a través de la descripción del entorno.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.

3.1.- El suelo.

La palabra suelo proviene del latín “*Solum*” que significa suelo, tierra o parcela. De acuerdo con la primera definición científica de Dokuchaev (1899), el suelo es: “Un cuerpo natural, formado por la acción común del material parental, el relieve, el clima, los organismos, vivos y muertos, y la edad de la superficie geológica”. La definición actual es más compleja: la última versión de la clasificación de los suelos WRB define el suelo como: “Un cuerpo natural continuo que tiene 4 dimensiones, tres dimensiones espaciales y una temporal” (WRB, 2015).

El sistema de clasificación ruso (Shishov *et al.*, 2004) define el suelo como: “Un cuerpo natural-histórico de fase sólida con un sistema de horizontes interrelacionados que componen un perfil genético y que se deriva de la transformación de la capa superior de la litosfera por la integridad de los agentes formadores de suelo”.

El sistema de clasificación francés pone énfasis en los aspectos espaciales de los suelos. Los pedólogos franceses definen el suelo como: “Un objeto natural, continuo y tridimensional (*Objet naturel, continu et tridimensionnel*) (AFES, 2008). Una variante relacionada considera que el suelo en la naturaleza es: “Un continuo tridimensional, temporalmente dinámico y espacialmente anisotrópico, tanto vertical como lateralmente” (Sposito y Reginato, 1992).

De acuerdo con la clasificación de los suelos de Cuba elaborado por el Instituto de Suelos de Cuba (2015), define al suelo como: “Un cuerpo natural constituido por un sistema de horizontes, los cuales se originan por la interacción de factores de formación, que dan lugar a procesos de formación, es decir sus génesis.” El sistema de horizontes genéticos interrelacionados con la génesis del suelo sobre el cual se establece la clasificación completa del suelo constituye el perfil diagnóstico (Hernández *et al.*, 2015).

Para poder realizar la descripción y clasificación de los suelos es necesario conocer la constitución de este desde su superficie hasta el material originario y para ello, se realiza cortes verticales del terreno, a los que se denomina perfiles diagnósticos. Al observar un perfil puede distinguirse una serie de capas, dado su disposición suele ser horizontal o sub horizontal, que reciben el nombre de horizontes (Porta, López – Acevedo y Poch, 2013). Cada uno de ellos suele tener características y

propiedades diferentes en un mismo suelo, de ahí la importancia de su identificación para su descripción y muestreo.

Los horizontes se delimitan atendiendo a los siguientes pasos (Porta *et al.*, 2013):

- Por las diferencias de color.
- Por las diferencias en las propiedades morfológicas: textura, estructura, elementos gruesos.
- Por diferentes propiedades asociadas: consistencia, compacidad, plasticidad, adhesividad y dureza.



Figura 1. Perfil general de un suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas. Fuente. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2017).

La definición de los horizontes genéticos es meramente cualitativa, lo que en algunos casos puede dificultar su empleo, es por esto que, también se utilizan los horizontes de diagnóstico, que son, horizontes definidos morfométricamente o al menos, con la mayor precisión posible, con datos de campo y laboratorio, para su utilización taxonómica.

El estudio de la morfología permite reconstruir los procesos edafogénicos, las condiciones del medio bajo las cuales aquellos tuvieron lugar, y en muchos casos, interpretar o predecir el

comportamiento de las plantas y la respuesta del suelo frente a actuaciones tecnológicas o a cambios de uso de suelo. No obstante, la variabilidad no es infinita y al existir suelos con horizontes semejantes resulta posible desarrollar un sistema de denominación general. Actualmente se designan con letras mayúsculas a los diferentes horizontes del suelo (Hernández *et al.*, 2015):

Horizonte O. Son estratos o capas dominadas por material orgánico formado a partir de acumulación de material orgánico no descompuesto o parcialmente descompuesto, como hojas, ramas, musgos y líquenes, que se han acumulado sobre la superficie del suelo; se pueden encontrar sobre suelos minerales u orgánicos. Los horizontes O no se encuentran saturados con agua por periodo prolongados. La fracción mineral de este tipo de material es solo un porcentaje del volumen de material y es generalmente la mitad del peso total.

Horizonte A. Son horizontes minerales que se formaron en la superficie del suelo o por debajo de un horizonte O, en el que toda o parte de la estructura de la roca original ha sido desintegrada y están caracterizados por uno o más de los siguientes puntos:

- Una acumulación de materia orgánica humificada íntimamente mezclada con la fracción mineral y que no presenta propiedades características de los horizontes E o B.
- Estructura granular y migajosa ideal para el cultivo de plantas.
- Por su estructura no consolidada proporciona un balance adecuado entre las fases sólidas, líquidas y gaseosas que integran el suelo.

Horizonte E. Es un horizonte mineral donde es rasgo principal es la pérdida de arcilla, hierro, aluminio o la combinación de estos, dejando una concentración de arena y partículas de limo, y en el que la mayor parte de la estructura rocosa original ha sido completamente desintegrada. Generalmente este horizonte tiene un color más claro que el horizonte A y puede ser de color blanco hasta gris claro. También puede estar muy poco estructurado.

Horizonte B. Son horizontes que se formaron por debajo de un Horizonte A, E, H, O, y en el que los rasgos de los elementos dominantes son la desintegración de la mayor parte de la estructura de la roca original, junto con uno de los siguientes aspectos o sus combinaciones:

- Concentración iluvial, individual o en combinación de arcilla, silicatos, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso o sílice.
- Evidencia de remoción de carbonatos.
- Concentración residual de los sesquióxidos.
- Alteración que forma silicatos de arcillas o libera óxidos o ambos, y que forma una estructura de bloques subangulares, poliédrica, primática o columnar.

Horizonte C. Son horizontes o capas, excluyendo la roca dura, que han sido afectados por los procesos poli genéticos de manera mínima y no poseen las propiedades de los horizontes A, E, H, O, o B. La mayoría son estratos o capas minerales. Las raíces de las plantas pueden penetrar hasta el horizonte C, pero este no es un horizonte de acumulación de humus.

Horizonte R. Estos constan de lechos de roca dura que subyacen al suelo. Ejemplos son la caliza dura, granodiorita, basalto, areniscas, esquistos, areniscas tobáceas.

3.2.- Cobertura edáfica.

El término "Cobertura edáfica" se utiliza para discutir el aspecto espacial y continuo del suelo (Ruellan, Dosso y Fritsch, 1993). La cobertura edáfica es parte del paisaje, tridimensional y evolutiva, soporte de la vegetación, y no sólo está ligada a su posición en el paisaje, ontogenéticamente y funcionalmente, si no también, está ligada para condicionar su uso para los seres humanos. Las ideas más recientes se basan en el hecho de que la cobertura edáfica es un componente importante de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y su verdadero estudio consiste en tomar en cuenta su extensión en el espacio y, por lo tanto, su desarrollo en el tiempo (Pedro, 1989).

El concepto de "Cobertura edáfica", surge de la escuela rusa de suelo a partir del reconocimiento de las combinaciones de los suelos, definiendo sucesiones regulares (Sibirtsev, 1909), y de la concepción de la "topografía de suelos", introducido por Dokuchaev (1895) para denotar las sucesiones espaciales de los suelos conectados con los elementos del relieve (Fridland, 1974).

En los años 1930, las ideas de la distribución del suelo se comienzan a desarrollar en Gran Bretaña, con las "catenas y su mapeo" (Milne, 1935) y en Estados Unidos de América, las asociaciones de suelos como "unidades cartográficas" (Kellogg, 1938). En Francia, la atención llevada del suelo a ese carácter de "Cobertura edáfica", fue introducido a partir de los años setenta por pedólogos

franceses (Bocquier, 1973; Boulet, 1974; Chauvel, 1977; Humbel, 1978), a partir de los resultados de los estudios realizados en África y la Guayana Francesa, y posteriormente en Francia y Brasil en 1980.

De acuerdo con Baize (1986), el término “Cobertura edáfica” indica una cierta extensión geográfica, es decir, una continuidad espacial, mientras que, el adjetivo "edáfico" define el objeto estudiado. Para el autor, esta nueva forma de entender la variación y distribución del suelo en el paisaje llamada cobertura edáfica para los científicos del suelo franceses en los años 70, permitió avances, especialmente en el campo de la cartografía y la investigación relacionada con la pedogénesis (Santos, 2000). Actualmente, el término “cobertura edáfica” sustituye ventajosamente ahora la noción de "suelo" decididamente demasiado vaga y ambigua (Baize, 1986). Además, cuando se habla de los principios de la cartografía edáfica, los mapas de suelo construidos a partir de perfiles verticales son reduccionistas. De acuerdo con Fernández (1985), los perfiles verticales del suelo representan una visión incompleta de la realidad, ya que sólo presentan las variaciones de las características morfológicas y las propiedades fisicoquímicas en la dirección vertical, sin representar las variaciones horizontales. Así mismo, coincide con esta idea Boulaine (1978), diciendo que el suelo es un cuerpo continuo y tridimensional, y que los perfiles del suelo solo son más que el producto del trabajo intelectual de los científicos del suelo, diseñados para facilitar el análisis y delimitación en el paisaje.

3.3.- Cambios de la cobertura edáfica.

Las actividades humanas y los cambios en el uso de la tierra han conducido a la transformación completa del edafopaisaje (Krasilnikov *et al.*, 2011). Los efectos de las actividades humanas han provocado cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que llevado a cambios en su posición taxonómica hasta la destrucción completa del perfil (Dudal, 2005). Desde el punto de vista edafogeográfico las actividades humanas provocan los siguientes cambios en la cobertura edáfica (Krasilnikov *et al.*, 2011);

Construcción de suelos y edafopaisajes artificiales.

Actualmente los suelos transformados por el hombre se reconocen como taxones particulares en casi todas las clasificaciones edáficas (Krasilnikov *et al.*, 2009). De acuerdo con la clasificación de la WRB (2015), incluye dos grupos de suelo profundamente cambiados antropogénicamente:

los Antrosoles que incluyen suelos agrícolas y los Tecnoles que abarcan suelos de zonas urbanas, industriales y mineras.

Transformación de los componentes de la cobertura edáfica.

La transformación de los componentes de la cobertura edáfica provoca cambios en las propiedades de los suelos, que no siempre llevan al suelo a los grupos taxonómicos de los Antrosoles y Tecnoles, sino que provoca cambios en su posición taxonómica.

Unificación y homogenización del mosaico de suelo.

La mayor variabilidad del espesor y propiedades se observa en los horizontes superficiales, la pérdida de la capa superficial lleva a la formación de una cobertura edáfica más uniforme.

Aumento del contraste entre los componentes de la cobertura edáfica.

El riego y el drenaje del suelo aumentan el contraste de los suelos. Por ejemplo, el riego en las zonas áridas y semiáridas, especialmente con agua mineralizada, origina salinización y modificación del suelo. Dichos procesos tienden a una distribución compleja que depende del micro relieve y cercanía a los canales de riego (Mikheeva, 1997).

Destrucción de la cobertura edáfica.

La destrucción de la cobertura edáfica se define como: “La eliminación de todos los horizontes del suelo hasta el material parental”. Aunque los horizontes edáficos naturales estén ausentes en los suelos destruidos, todavía se clasifican como suelos y se reflejan en los mapas edáficos. Por ejemplo, los suelos erosionados o eliminados por maquinaria se clasifican como pocos desarrollados Regosoles. Las razones principales de la destrucción del suelo son: erosión, minería, construcción urbana y vías de comunicación (Krasilnikov *et al.*, 2011).

3.4.- Degradación de suelo.

La erosión del suelo es un componente crítico de la degradación de la tierra, la FAO en su portal en internet www.fao.org define la degradación del suelo como: “La pérdida o disminución de la capacidad productiva del suelo como resultado de la erosión del suelo, y cambios en las funciones hidrológicas, biológicas, químicas, y físicas de los suelos”. La pérdida de suelo de las superficies terrestres debido a la erosión, es un problema generalizado a nivel mundial, y afecta

negativamente la productividad de todos los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos, y de los ecosistemas agrícolas, forestales y de pastizales (Pimentel y Burgess, 2013). Junto con el aumento en la población humana, la erosión del suelo, la disponibilidad de agua, la energía y la pérdida de biodiversidad se clasifican como los principales problemas ambientales en todo el mundo (Pimentel, 2006).

La erosión del suelo se define como: “La pérdida de la capa superior del suelo por fuerzas físicas como la lluvia, el agua, el viento, el hielo, la temperatura, la gravedad u otros agentes naturales o antropogénicos que desgastan, desprenden y eliminan las partículas del suelo o el material geológico transportándolo y redistribuyéndolo sobre el paisaje y/o depositándolo en cuencas o sitios acuáticos” (Comisión de las Comunidades Europeas, 2002; Lal, 2014). Existen dos principales tipos de erosión del suelo: La erosión geológica y la erosión acelerada (Blanco y Lal, 2008). La erosión geológica es un proceso normal de erosión que generalmente ocurre a bajas tasas en todos los suelos como parte del proceso natural de formación del suelo (Lal, 2014), este tipo de erosión ocurre en largos periodos de tiempo y no está influenciado por la actividad humana. En contraste, la erosión acelerada, ocurre cuando las tasas de erosión exceden las tasas de formación. Este tipo de erosión se desencadena por causas antropogénicas como: la deforestación, la agricultura, la quema de biomasa y el pastoreo intensivo y descontrolado (Blanco y Lal, 2008). Los problemas relacionados con la erosión del suelo incluyen la pérdida de la capa del superior de suelo, donde más se concentran los nutrientes del suelo (Lal, 2014) y químicos agrícolas (fertilizantes y pesticidas) (Blanco y Lal, 2008), incrementando los niveles de sedimentación, contaminación y eutroficación en los cuerpos de agua (Lal, 2014), reduciendo así la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua, y de las formas de vida de arroyos, ríos, lagos y zonas costeras (Eroglu, Cakir, Sivrikava, Akay, 2010). Además, la erosión provoca la emisión de carbono orgánico del suelo a la atmósfera en forma de CO_2 y CH_4 , lo que ocasiona un impacto en el calentamiento global (Lal, 2018). La erosión del suelo también constituye una amenaza hacia varios aspectos socioeconómicos y ambientales de las comunidades rurales ya que gran parte de ellos dependen los bienes y servicios derivados de los ecosistemas terrestres y acuáticos para su subsistencia (SDG, 2018).

Los principales procesos de pérdida de suelo son: erosión por salpicadura, laminar, en surco, en cárcavas y en masa (Blanco y Lal, 2008):

La erosión laminar se refiere al proceso que elimina una delgada capa de la superficie del suelo debido a la escorrentía del agua y al impacto de las gotas de lluvia (Pimentel y Burgess, 2013). Este tipo de erosión se produce de manera uniforme sobre las pendiente y pasa desapercibida hasta que se ha perdido la mayor parte de la capa más productiva del suelo (Pimentel, 2006). Mientras que, el proceso de erosión por salpicadura involucra el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo, las gotas de lluvia se dispersan y salpican el suelo desplazando las partículas de su posición original (Blanco y Lal, 2008). Sin embargo, para fines de simplificación, los dos procesos son a menudo considerados juntos en el modelado de la erosión y representan aproximadamente el 70 % de la erosión total del suelo (Blanco y Lal, 2008).

La erosión en surcos se desarrolla cuando el agua superficial se concentra en líneas de drenaje continuas o riachuelos sobre depresiones o puntos bajos, incidiendo sobre la superficie del suelo provocando que se erosione (Blanco y Lal, 2008). Estos surcos se caracterizan por ser pequeños canales de anchura reducida y escasa profundidad, que puede tener hasta 30 cm de profundidad y alrededor de 50 cm de ancho, suelen causar una gran erosión del suelo, especialmente bajo lluvias intensas (Blanco y Lal, 2008) y pueden ser eliminados por la labranza agrícola. El proceso de erosión en surcos está en función de la velocidad del flujo de agua, la capacidad de transporte de las partículas del suelo y del corte hidráulico del flujo de agua. La erosión en surcos es la segunda vía más común de erosión del suelo después de la erosión laminar (Blanco y Lal, 2008).

La erosión en cárcavas es una etapa avanzada de la erosión en surcos donde los canales superficiales se erosionan hasta el punto en que se convierten en un factor limitante en las operaciones de labranza normal. Debido a que la erosión en cárcavas crea canales en forma de U o V, que se forman principalmente por el flujo concentrado del agua que converge en el punto más bajo del relieve, provoca incisiones en el suelo hasta transformarse en grandes canales continuos con una profundidad a menudo limitada de al menos 2 de profundidad (Blanco y Lal, 2008).

3.5.- Mapeo de la erosión del suelo.

La Percepción Remota junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG's) proporciona información clave sobre la dinámica de erosión y su intensidad en el tiempo y espacio, esto es fundamental para proporcionar una línea de base para la evaluación, control y predicción de la erosión del suelo (Wang, Gertner, Fang, Anderson, 2003). Por lo tanto, es crucial la información espacial y temporal actualizada sobre la magnitud y el alcance de erosión del suelo

para la propuesta de medidas de planificación de la conservación del suelo y programas de la rehabilitación de la tierra (Aydda, Essemani, Taghya, 2014). Además, esta información es valiosa para gobiernos internacionales, activistas medioambientales, edafólogos e hidrólogos y organismos ambientales (gubernamentales y privados), ya que permiten que los esfuerzos de prevención de la erosión se embarquen en campañas de investigación, conservación de suelo y programas de sensibilización en todo el mundo, en un intento por detener la degradación de la tierra (Sepuru y Dube, 2018).

La limitación asociada con estos esfuerzos es la falta de información precisa y actualizada de las áreas afectadas por la erosión del suelo, así como su magnitud (Sepuru y Dube, 2018). Por ejemplo, la mayoría de estos esfuerzos están restringidos a métodos tradicionales, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), sin embargo, aunque estos métodos permiten una estimación de los valores absolutos de pérdida de suelo, en la mayoría de los casos, se han utilizado solo para evaluar el papel de ciertos factores de erosión, desarrollo de modelos y con el propósito de validar la información, más que para la evaluación espacial de la erosión del suelo (Montgomery, 2007), y considerando también que los programas de conservación tienen limitaciones debido a que las comunidades dentro de las áreas afectadas no tienen un sentido de pertenencia (Merritt, Letcher, Jakeman, 2003). Por lo tanto, no existe un único método sencillo para evaluar la erosión, y la evaluación de la erosión, lo cual depende en gran medida de la escala espacial y del propósito de la evaluación (Warren, 2002).

Se ha demostrado que el uso de técnicas de percepción remota y SIG's tiene potencial para evaluar la erosión a escala regional, incluida la identificación de superficies erosionadas, la estimación de los factores que condicionan la erosión, la investigación de las características del suelo y la vegetación, y el avance de la erosión a lo largo del tiempo (Vrieling, 2006). Otras metodologías aplicadas a inventarios y monitoreo de procesos de erosión incluyen composición de bandas (Bocco *et al.*, 1991), índices de vegetación (Hochschild *et al.*, 2003) y la combinación de datos de teledetección con las covariables ambientales que condicionan la erosión del suelo tales como; características climáticas, topográficas, propiedades de los suelos y manejo y uso de suelo a través de observación de campo, experimentación y técnicas estadísticas (McBratney, Mendonca, Minansy, 2003). Además, otros estudios han demostrado la utilidad de las técnicas de detección

remota satelital para determinar los patrones espaciales y temporales de la erosión del suelo (Seutloali *et al.*, 2016).

3.6.- Teledetección satelital de la erosión del suelo.

Las técnicas de Percepción Remota mediante fotografías aéreas e imágenes satelitales han aumentado considerablemente la capacidad de registrar y monitorear la degradación de la tierra a nivel local, nacional y regional (Le Roux *et al.*, 2007). Debido al avance tecnológico existen una gran cantidad de sensores que nos permiten obtener información de las características de la superficie terrestre, estos sensores se pueden dividir en aquellos que miden la reflexión de la luz solar en la parte visible e infrarroja del espectro electromagnético (sistemas ópticos) y aquellos que transmiten activamente los impulsos de microondas y registran la señal recibida (imágenes de radar) (Vrieling, 2006).

Los datos de detección remota satelital más comúnmente utilizados en el modelado de la erosión del suelo provienen de las imágenes satelitales Landsat (Luleva, 2013). La principal ventaja de los sensores Landsat es el aspecto multitemporal, la disponibilidad y acceso libre a las escenas, permitiendo la evaluación y el monitoreo a largo plazo del alcance de la erosión del suelo (Vrieling, 2006). Sin embargo, una desventaja es la baja resolución espacial de las escenas, lo cual inhibe la detección de las características individuales de la erosión (Seutloali *et al.*, 2016). Por ejemplo, para la detección de la erosión en cárcavas, se han utilizado técnicas de interpretación visual y la combinación de bandas de imágenes de diferentes sensores (Bocco *et al.*, 1991).

3.7.- Características espectrales de suelos erosionados.

La reflectancia espectral de los suelos está influenciada por la composición mineral, la textura del suelo, la humedad y la materia orgánica (Chuvieco, 2002). Cuando la capa superior del suelo es eliminada por la erosión, el volumen de materia orgánica y óxidos de hierro disminuye, y gradualmente la roca se vuelve visible en la superficie (De Jong *et al.*, 1999). De esta manera, las diferencias espectrales causadas por cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de la capa superior del suelo debido a los procesos relacionados con la eliminación del suelo, el transporte y la acumulación del suelo, permiten la posibilidad de la delimitación de los suelos erosionados utilizando fotografías aéreas o imágenes satelitales, lo cual también depende en gran medida la intensidad de los procesos erosivos (laminar, en surcos o cárcavas) del suelo. Por tanto, es importante entender la respuesta espectral del suelo y de las distintas características de la

superficie terrestre y los niveles de erosión del suelo para ser mapeados como una característica discreta del paisaje a través de la detección remota.

3.8.- Técnicas de clasificación.

Los métodos de teledetección tradicionalmente utilizados para la detección de áreas erosionadas, incluyen la interpretación visual de imágenes aéreas basadas en la interpretación del color del suelo y sus cambios relacionados con los procesos de erosión (Chuvieco, 2002). Una alternativa para las técnicas de interpretación visual es la extracción automática de información digital de las áreas erosionadas a partir de imágenes satelitales mediante algoritmos de clasificación, lo cuales se basan en el reconocimiento de patrones espectrales y/o estructurales de las diferentes características de la superficie terrestre (Alatorre y Beguería, 2009). La extracción automática incluye técnicas de clasificación supervisada y no supervisada. La clasificación no supervisada, consiste en agrupar píxeles de acuerdo a su similitud espectral relativa, por ejemplo, el algoritmo Isodata, normalmente se lleva a cabo para obtener una idea sobre la variabilidad espectral. En este método, la separación de los grupos de píxeles se lleva a cabo basándose en patrones espectral estadísticamente similares para obtener categorías de información determinando las clases que son espectralmente diferentes, y luego define su valor de información (Lillesand y Kiefer, 1994). A diferencia de los clasificadores no supervisados, la clasificación supervisada permite a los analizadores de imágenes utilizar píxeles específicos (sitios de entrenamiento) para especificar los diversos valores de píxeles que deberían asociarse con cada clase. El método de clasificación más comúnmente utilizado se basa en algoritmo de máxima probabilidad, sin embargo, este enfoque de clasificación tiene limitaciones para resolver clases complejas que no se distribuyen normalmente, dado que los niveles de erosión y sus áreas circundantes son espectralmente compleja, la aplicación de este algoritmo paramétrico puede ser bastante desafiante para el mapeo de la erosión del suelo (Seutloali *et al.*, 2016). Fulajtar (2001) señaló que se necesitan datos auxiliares adicionales para la clasificación de los patrones de erosión con comprobación en campo, y Alatorre y Beguería (2009) recomiendan una combinación entre los enfoques de clasificación automática e interpretación visual.

3.9.- Índices de vegetación para el mapeo de la erosión del suelo.

Los índices de vegetación (IV) juegan un papel vital en la detección y mapeo de las áreas que han sido afectadas por diferentes formas e intensidades de erosión. Actualmente, se utilizan

diversos índices para la evaluación indirecta de la erosión del suelo utilizando la cobertura vegetal como parámetro para identificar los procesos y niveles de erosión del suelo (Luleva, 2013; Vrieling, 2007). Por ejemplo, la cartografía de la erosión del suelo se ha basado principalmente en el uso de IV derivados de imágenes satelitales (Le Roux *et al.*, 2008; Taruvinga, 2009). Por ejemplo, Hochschild *et al.*, (2003) utilizó una imagen satelital Landsat 5 TM de 1996 para mapear los diferentes procesos de erosión en la cuenca del río Mbuluzi, al crear una correlación negativa entre los niveles de erosión y el Porcentaje de Cobertura Vegetal (FVC). Es importante mencionar que la cobertura vegetal juega un papel sumamente importante sobre la prevención de la erosión, debido a que mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aumentando el contenido de materia orgánica, además de disminuir la fuerza de impacto de la gota de lluvia y la velocidad de escorrentía del agua, aumentando la infiltración del agua y la estabilidad de la estructura del suelo (Descroix, Viramontes, Vauclin, Barrios y Esteves, 2001). Por lo tanto, la cubierta vegetal es uno de los indicadores biofísicos más importantes de la erosión del suelo, lo que permite la delimitación de la distribución de la vegetación y el suelo basado en patrones de reflectancia característicos de la vegetación verde (Hochschild *et al.*, 2003).

CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

4.1.- Delimitación del área de estudio.

El área de estudio se ubica entre los paralelos $18^{\circ} 50' 00''$ y $18^{\circ} 55' 00''$ y los meridianos $98^{\circ} 09' 00''$ y $98^{\circ} 03' 00''$, dentro de la zona 14 del hemisferio norte, con una superficie total de 3108 ha. El área pertenece a la parte norte del municipio de Tzicatlacoyan, en donde se encuentran las localidades de San Miguel Acuexcomac, San Bernardino Tepenene, San José Tejaluca y San Martín los Teteles. La población es de 2631 habitantes (INEGI, 2015b) y presentan altos niveles de marginación (CONEVAL, 2015). En la **Figura 2** se muestra la localización del área de estudio.

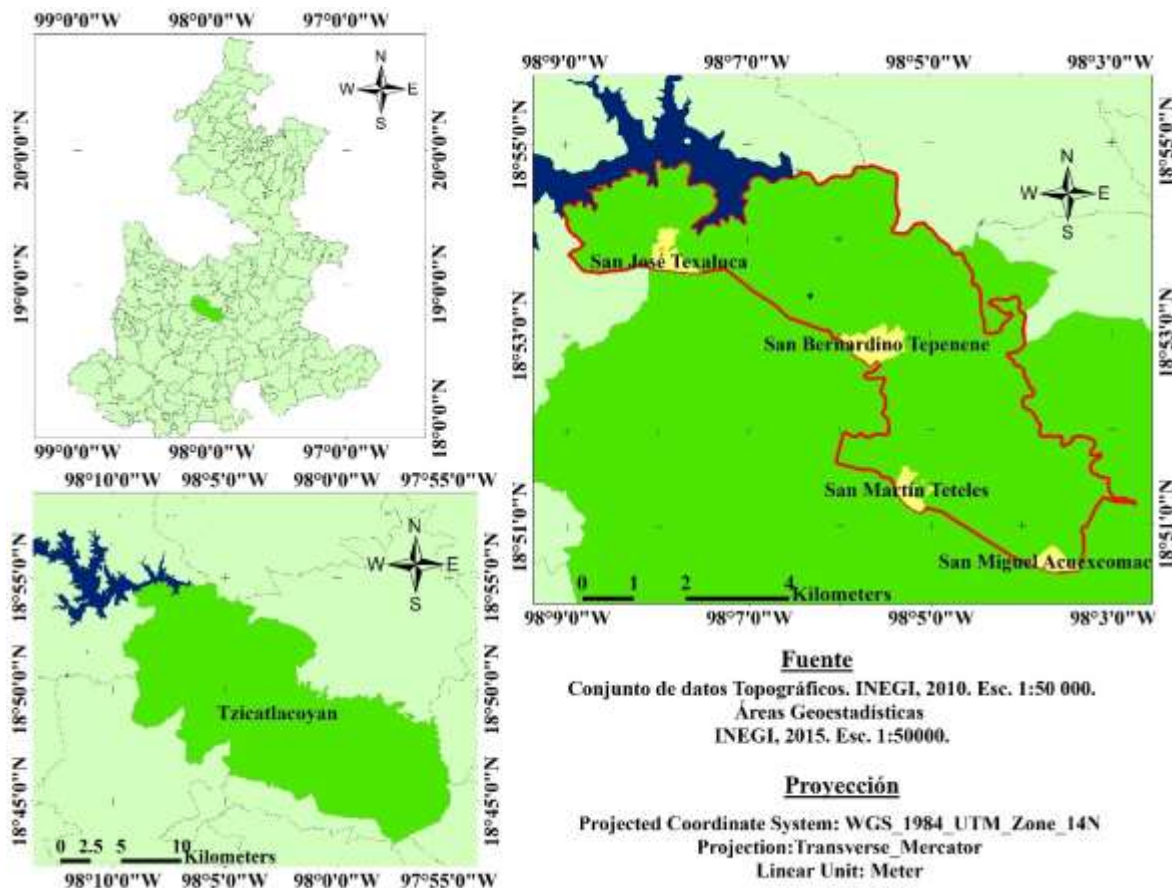


Figura 2. Localización de la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia, a partir de los datos vectoriales de INEGI (2010).

4.2.- Suelos.

El conjunto de datos edafológicos se obtuvo de INEGI, de la carta edafológica escala 1:250 000 serie II (INEGI, 2006), la cual describe cuatro unidades de suelos, de acuerdo con la delimitación que se hizo para nuestra área de estudio, los cuales se describen a continuación:

Los Leptosoles son suelos poco profundos sobre roca dura continua o con alto contenido de gravas y piedras (del griego *Leptós*, que significa delgado), tienen poco contenido en tierra fina, por lo que su capacidad para almacenar agua es mínima. Se pueden distinguir dos tipos: los suelos poco profundos que recubren una masa rocosa y los suelos altamente pedregosos, que, localmente, pueden ser profundos. Están muy extendidos por todo el mundo y se encuentran principalmente en las regiones montañosas, los desiertos y en zonas donde el suelo se ha erosionado. En estos suelos suelen desarrollarse actividades como el pastoreo extensivo o para la repoblación forestal con el objetivo de recuperar suelos.

Los Calcisoles son un tipo de suelos asociado con un clima árido o semiárido, asociados frecuentemente con materiales parentales calcáreos, se caracterizan por presentar una acumulación de carbonato cálcico (horizonte cálcico) a cierta profundidad, ya sea por translocación desde horizontes más superficiales o por aportaciones laterales de aguas ricas en bicarbonatos (WRB, 2015). El calcio procede principalmente de la intemperización de materiales calcáreos (p.ej. calizas), pero también de yeso o feldespatos, cuando el agua del suelo se sobresatura de iones calcio y bicarbonato, los carbonatos secundarios se precipitan lo que produce una impregnación de la matriz del suelo o en forma de finas partículas de calcita de <1 mm, dispersas en la matriz o como concentraciones discontinuas (venas, pseudomycelia, recubrimientos, suaves y / o nódulos duros) (Gardi *et al.*, 2014).

Los Phaeozems, son suelos ligeramente ácidos o neutros con un horizonte mineral superficial grueso y oscuro (del griego *phaiós*, oscuro y del ruso, *zemlja*, tierra), se caracterizan por tener un horizonte mineral superficial oscuro, rico en humus (WRB, 2015). Se encuentran principalmente en las regiones templadas subhúmedas. Su humedad relativamente elevada impide que se acumulen los carbonatos secundarios o sales solubles. Debido al alto contenido en humus y iones de calcio que se unen a las partículas del suelo, los Phaeozems presentan una estructura muy permeable y bien agregada. Son suelos fértiles que se encuentran en las pampas sudamericanas o bosques de zonas elevadas del trópico (Gardi *et al.*, 2014).

Los Vertisoles son suelos arcillosos con alta proporción de arcillas expandibles, que experimentan expansión y contracción (del latín *vertere*, que significa voltear). Su denominación hace referencia a la remoción contante del material de suelo. En su parte subsuperficial aparecen agregados en forma de cuña con superficies pulidas y acanaladas (*Slickensides*). Al secarse (lo que ocurre casi todos los años, forma grietas anchas y profundas desde la superficie hasta abajo. Los vertisoles se encuentran típicamente en posiciones bajas del paisaje tales como fondos de lagos secos, cuencas de ríos, terrazas inferiores de ríos y otras tierras bajas, allí donde el clima muestra una alternancia entre la época húmeda y la seca. Este tipo de suelos aparecen en la mayoría de los países de Latinoamérica (Gardi *et al.*, 2014).

4.3.- Vegetación y uso de suelo.

La zona de estudio se encuentra dentro de las provincias florísticas de la Depresión del Balsas y las Serranías Meridionales, aunque principalmente está ubicada en la provincia florística Serranías Meridionales (CIEMAD,2010). La región sur de la presa de Valsequillo presenta diferentes tipos de vegetación terrestre. De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de vegetación y uso de suelo escala 1.250 000 serie IV (INEGI, 2013), en el área existen cuatro tipos generales de vegetación y uso de suelo: agricultura, pastizal, bosque de encino y matorral xerófilo.

- **Agricultura.** El uso de suelo en la zona de estudio es empleado, en su mayoría, para la agricultura de temporal, y en menor proporción en vegetación inducida. Se clasifica como tal cuando los cultivos que se siembran dependen del agua de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener agua (INEGI, 2015).
- **Pastizal.** Áreas donde la vegetación ha sido marcadamente transformada por las actividades humanas o en el caso extremo totalmente eliminada, con lo cual se ha establecido una cantidad de gramíneas para ganadería, y agricultura para cosechas y consumo humano (INEGI, 2015b).
- **Bosque de Encino.** Los bosques de encino en Valsequillo son vestigios de bosques que cubrieron el valle de Puebla históricamente. La zona de estudio se caracteriza por comunidades arbóreas y arbustivas integrados por especies del género *Juniperus* y *Quercus*, entre las especies están el Sabino (*Juniperus deppeana*), *Juniperus flaccida* (Enebro) *Quercus glaucoides* (Chabarro), *Quercus opaca* (Encino) *Quercus acutifolia* née

(Encino rojo) y *Quercus liebmanii* (Encino). Los cuales se presentan con frecuencia en los cerros, lomeríos y barrancas (CIEMAD, 2010; INEGI, 2013) (**Imagen 1**).



Imagen 1. *Quercus liebmannii* (Encino prieto).

- **Matorral Xerófilo.** Comunidad vegetal formada por arbustos o árboles bajos, inermes o espinosos que se desarrolla en una amplia zona de transición ecológica entre la Selva Baja Caducifolia (Bosque de encino), matorrales xerófilos de semiáridas, y pastizales. Prácticamente toda la vegetación primaria ha desaparecido; sin embargo, aún subsisten importantes áreas cubiertas por vegetación secundaria arbustiva, en cuya vegetación sobresale la presencia de *Yucca periculosa* (Yuca) (**Imagen 2**), *Agave salmiana var. ferox* (Agave pulquero) (**Imagen 3**), *Opuntia ficus-indica* (Nopal), *Brahea dulcis* (Palma dulce), *Acacia farnesiana* (Espino), *Tecoma stans* (Tronadora), *Buddleja cordata* (Tzonpantle), *Larrea tridentata* (Jarilla) (**Imagen 4**), *Ipomoea arborscen* (Cazahuate blanco), *Obucarnea* (Pata de elefante o palma barrigona), *Bursera microphylla* (Copalillo), *Eysenhardtia polystachya* (Palo dulce), *Bursera martae* (copal macho), *Pachycereus marginatus* (Cactus organo).



Imagen 2. *Yucca periculosa* (Yuca).



Imagen 3. *Agave salmiana var. ferox* (Agave pulquero).



Imagen 4. *Brahea dulcis* (Palma dulce).

4.4.- Geología.

La caracterización geológica se realizó principalmente en base a la información geológica del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y de los conjunto de datos geológicos escala 1: 250 000 de INEGI.

Las rocas más antiguas observadas en la zona de estudio corresponden a una secuencia de rocas mesozoicas perteneciente a la Formación Mezcala (*Ktm Lu – Ar*) del periodo Cretácico superior (SGM, 2017), constituidas principalmente por una secuencia de rocas calcáreas, lutitas y areniscas, las cuales afloran al sur de la localidad de San Bernardino Tepehene y se extiende en dirección Noroeste-Suroeste.

Las rocas cenozoicas pertenecientes al periodo neógeno y paleógeno, corresponde principalmente a rocas ígneas extrusivas: andesitas, basaltos, tobas intermedias y acidas, depósitos piroclásticos y escorias (SGM, 2017). Estas rocas se encuentran aflorando al norte de la localidad de San Bernardino Tepehene y al este de San José Tejaluca.

Las rocas ígneas cenozoicas que corresponden al periodo neógeno están representadas en el mapa geológico del SGM por rocas intermedias de composición andesítica de diversa textura que yacen discordantemente a las rocas sedimentarias del mesozoico, y se encuentran en forma de derrames basálticos, brechas y tobas volcánicas, que están representadas en el mapa geológico SGM como la unidad (*TplLqHo A – BvDa*) constituida por andesitas y brechas volcánicas dacíticas (SGM, 2017).

Las rocas ígneas cenozoicas que pertenecen al periodo Neógeno-Paleógeno se encuentra aflorando al sur de la zona de estudio en las cercanías de la localidad de Acuexcomac y Tzicatlacoyan, corresponden a rocas volcánicas extrusivas (tobas intermedias y ácidas, y otros productos vulcanoclásticos). Se encuentran representadas en el mapa geológico del SGM por la unidad de roca (*Tpl R – TR*) Rolita-Toba Riolítica (SGM, 2017).

Las rocas más jóvenes corresponden a depósitos de areniscas, conglomerados, aluviones, y secuencias vulcano-sedimentarias. Los conglomerados y areniscas se formaron en el lecho de paleo cauces resultado del transporte y la consolidación de las rocas (cantos rodados, arenas y areniscas).

4.5.- Fisiografía.

Desde el punto de vista fisiográfico, el territorio mexicano está conformado por 15 provincias fisiográficas. Una provincia fisiográfica se define como: “Una región natural constituida por una serie de conjuntos o unidades de relieve, con relaciones similares entre sí de tipo geológico, topográfico y espacial” (Villota, 1992). Las subprovincias fisiográficas son aquellas unidades escala media (entre 1:100,000 y 1: 000,000) o de menor extensión asociadas a la provincia, pero se distinguen por poseer rasgos geomorfológicos estructurales propios, que merecen su individualización, al momento de ser cartografiados. De acuerdo con las características topográficas, geológicas, orográficas e hidrológicas de la zona de estudio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Cinturón Volcánico Transversal (CVT), y a su vez dentro de la subprovincia valles y volcanes de Anáhuac (SGM, 2017).

La expresión fisiográfica de CVT se caracteriza por la gran variabilidad de estructuras volcánicas tales como conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos, calderas y algunos cuerpos intrusivos (Aguirre-Díaz *et al.*, 1997). El volcanismo se originó a través de un sistema de fracturas y fallas de tensión con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, y WNW-ESE en su parte occidental (Ferrari, 2014). El CVT tiene aproximadamente mil kilómetros de longitud y una amplitud irregular entre 80 y 230 km, lo cual explica el aspecto bien definido de la provincia como un arco magmático continental, que se extiende desde la Costa del Pacífico hasta la costa del Golfo de México (Demant, 1978). En esta provincia volcánica de edad cenozoica se concentra una parte importante de la población y de la actividad económica del país; adicionalmente su formación ha tenido un impacto importante en la evolución del clima y de la biodiversidad de México (Ferrari, 2014).

4.6.- Clima.

Se define como el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan al estado medio de la atmósfera en un lugar específico de la superficie terrestre. El clima es el factor dominante en la formación de suelos y su mayor influencia está dada por la precipitación y temperatura (Jenny, 1941). La información climática se obtuvo de la página de INEGI. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (García, 1983) para la República Mexicana indica que el subtipo climático presente en el área de estudio es templado subhúmedo con lluvias en verano e invierno seco (Cwb). La temperatura media anual del mes más cálido es menor a los

22 °C, la temperatura media anual supera los 10°C durante cuatro o más meses al año y la temperatura media anual del mes más frío se encuentra por encima de los 0 °C (INEGI, 2017). El régimen de lluvia es de por lo menos 10 veces más lluvia en el mes más húmedo de verano que en el más seco, es decir, un porcentaje del 70 % o más de la precipitación anual promedio es recibida en los seis meses más cálidos (INEGI, 2017).

El climograma se realizó con los datos de las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), periodo comprendido: 1951 – 2010, los cuales representa los valores medios de precipitación y temperatura de la zona de estudio, recabados por la estación meteorológica “00021016 BALCON DIABLO”, localizada en la localidad de San Juan Tejaluca, altura 2,120.0 msnm, (Latitud 18° 53' 51" N, Longitud 098° 07' 56" W) (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones pluviométricas alrededor del área de estudio.

Nombre estación	Latitud (Y)	Longitud (X)	Altitud (msnm)	Precipitación media anual (mm)
BALCON DIABLO	18° 53' 51"	98° 57' 56"	2120	724.7

Fuente. SMN (2017).

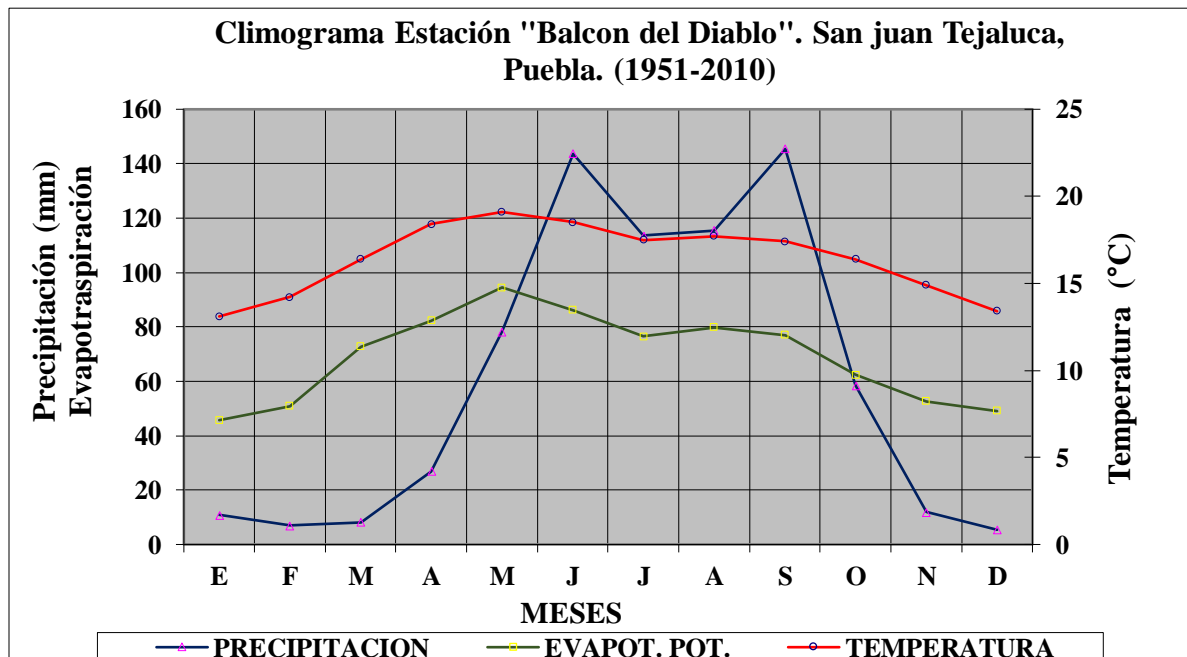


Figura 3. Climograma de la estación “Balcón del Diablo” (1951–2010). Fuente. Elaboración propia con base a las Normales Climatológicas (SMN).

La **Figura 3** muestra la distribución de la temperatura media anual de 16.4 °C, con una temperatura mínima y máxima normal de 8.4 y 24.4 °C respectivamente, el mes más caluroso es mayo con 19.1°C y el mes más frío es enero con 13.1°C de temperatura media. La precipitación total anual es de 724.7 mm, entre los meses de mayo y octubre se presentan los máximos mensuales de precipitación respecto a los valores medios, septiembre es el mes más lluvioso con 145.4 mm y con la máxima mensual de 409.2 mm, mientras que en diciembre y febrero tienen una precipitación mínima de 5.4 mm y 6.9 mm respectivamente, siendo febrero con la mínima precipitación máxima mensual de 39.9 mm. La distribución de las precipitaciones está marcada por dos períodos; uno seco desde mediados de octubre hasta abril y otro húmedo de mayo hasta mediados de octubre.

4.7.- Hidrología.

La zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca del Alto Balsas que pertenece, a la Región Hidrológica del Balsas. La región hidrológica del Balsas está compuesta de 15 cuencas, y entre estas la cuenca del alto Atoyac es donde el río Atoyac se localiza. La cuenca del Alto Atoyac tiene un área de contribución de 4135.52 km^2 e incluye parte de los estados de Puebla (22 municipios) y Tlaxcala (47 municipios) (DOF,2010), se extiende desde donde nace el drenaje del río Atoyac hasta la presa "Manuel Ávila Camacho" (Valsequillo).

El Río Atoyac pertenecen a la cuenca del Alto Atoyac y a la subcuenca del río Balsas. Se origina del deshielo del volcán Iztaccíhuatl en el estado de Puebla, a una altitud de 3250 msnm. Tiene una longitud de 84.97 km, una sección transversal entre 15 y 60 m, y una profundidad de 1-3 m (Martínez, 2017). En su descenso, la corriente pasa por el estado de Puebla aproximadamente 30 km de su recorrido, Tlaxcala (~ 22 km), y nuevamente a través de Puebla (~ 32 km) donde se acumula en la presa de Valsequillo (DOF,2011).

La presa de Valsequillo es el cuerpo de agua permanente más grande en el estado de Puebla, con una superficie de 2,832 ha (CIEMAD, 2011) y una capacidad de almacenaje agua de 281.7 hm^3 (CONAGUA, 2009). Fue construida para regular y aprovechar el agua del río para regar los cultivos agrícolas. Además, la presa de Valsequillo previene inundaciones en las comunidades bajo de la presa.

4.8.- Caracterización socioeconómica.

4.8.1.- Situación socioeconómica a nivel nacional, estatal y municipal.

En el año 2016 en México, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) reportó la existencia de 53.4 millones de personas vivían en pobreza lo que representaba el 43.6 por ciento de la población, de los cuales 9.4 millones viven en condiciones de extrema pobreza. Por otro lado, en el mismo año en el estado de Puebla se registraron 3.7 millones de personas con algún grado de pobreza de los cuales 562 mil padecían de pobreza extrema (59.4 por ciento) y a su vez, el nueve por ciento se encontraba en pobreza extrema, cifras que ubican al estado de Puebla en la cuarta posición a nivel nacional, después del Estado de México (8.2 millones), Veracruz (5 millones) y Chiapas (4.1 millones).

La marginación es un fenómeno multidimensional y estructural originado, en última instancia, por el modelo de producción económica expresado en la desigual distribución del progreso, en la estructura productiva y en la exclusión de diversos grupos sociales, tanto del proceso como de los beneficios del desarrollo (CONAPO, 2011). De esta manera, la marginación se asocia a la carencia de oportunidades sociales y a la ausencia de capacidades para adquirirlas o generarlas, pero también a privaciones e inaccesibilidad a bienes y servicios fundamentales para el bienestar.

De acuerdo con los resultados de las estimaciones del índice de marginación estatal 2015 presentados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), año en el que las mismas entidades del 2010: Guerrero, Chiapas y Oaxaca (en ese orden) registraron grado de marginación muy alto, en ellas vivían 10.6 por ciento de la población nacional, esto es, 12.7 millones de personas en el año 2015. Siete de las entidades federativas se clasificaron con grado alto, fueron en orden descendente: Veracruz, Puebla, San Luis Potosí, Yucatán, Michoacán, Hidalgo y Campeche. Estaban habitadas por 27.4 millones de personas, es decir, casi uno de cada cuatro mexicanos.

El Índice de Rezago Social es una medida ponderada que resume cuatro indicadores de carencias sociales (educación, salud, servicios básicos y espacios en la vivienda) en un solo índice que tiene como finalidad ordenar a las unidades de observación según sus carencias sociales (CONEVAL, 2015). De acuerdo con la CONEVAL Puebla ocupa el quinto lugar en el grado de rezago social a nivel nacional, con un índice de rezago alto después de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz con

muy alto grado de rezago social en 2015. Cuatro estados (Aguascalientes, Coahuila, Distrito Federal y Nuevo León) presentan un grado muy bajo de rezago social (CONEVAL, 2015).

En 2010, la ciudad de Puebla, capital del estado de Puebla presentó un grado de desarrollo humano alto de acuerdo con el índice que calcula la Organización de Naciones Unidas a partir de tres componentes: educación, salud e ingreso. Sin embargo, por su parte, las estimaciones de CONAPO sobre el nivel de marginación de los municipios en 2010 le atribuyeron a la ciudad de Puebla un nivel muy bajo, ocupando el lugar 210 a nivel estatal de 212 municipios. El problema es que con las cifras a nivel municipal se llega a disfrazar las situaciones de desigualdad y/o rezago presente al interior del estado.

El municipio de Tzicatlacoyan ocupaba el lugar 434 en el año 2015 dentro del contexto nacional en los indicadores de rezago social. Se ha mantenido desde el año 2000 hasta el 2015 con grados de rezago social altos. Estos indicadores tienen que ver con las necesidades que la población carece. El municipio de Tzicatlacoyan lo integran 12 localidades de las cuales 10 tienen entre 100 a 2500 habitantes. Sin embargo, 10.5 % de la población viven localidades con menos de 100 habitantes. La residencia en localidades pequeñas, que en muchos casos se encuentran dispersas y aisladas, se asocia con la carencia de servicios básicos como disponibilidad de agua, drenaje, servicio sanitario, electricidad y a la inaccesibilidad a servicios educativos, lo cual repercute en los ingresos percibidos por la población y en consecuencia en su bienestar (CONAPO, 2004).

La **Tabla 5** nos muestra que el 89.5 % de la población total en el municipio de Tzicatlacoyan pertenece a las principales localidades.

Tabla 5. Distribución de la población

Localidad	Población	Porcentaje de población
Tzicatlacoyan	1,185	18.98
San Miguel Acuexcomac	913	14.63
San Antonio Juárez	1,899	30.42
San Bernardino Tepenene	814	13.04
San José Tejaluca	776	12.43
Total	5,587	89.5

Fuente. Censo de Población y Vivienda, INEGI, 2010.

Por su extensión territorial, el municipio de Tzicatlacoyan comprende 279.68 hectáreas con una población de 6242 habitantes de los cuales 3165 son mujeres que representan el 50.94 % y 3020 son hombres que representan 49.06%, con una densidad de población de 22.31 habitantes por kilómetro cuadrado, muy por debajo de la media estatal (148 habitantes por kilómetro cuadrado y de la media nacional (61 habitantes por kilómetro cuadrado). Cabe señalar que la población femenina es mayor que la masculina, respondiendo al total general de la población nacional.

La **Tabla 6** nos muestra la distribución de la población según su edad y sexo. Los rangos de edad en los que se encuentra el mayor número de población son de 0 a 14 años con 2365 habitantes y en segundo lugar una población con un rango de edad entre 25 a 64 años, por un lado, esto nos indica una población creciente donde el mayor número de individuos tiene una edad menor o igual a 14 años, y por el otro, una población que se encuentra en edad económicamente productiva.

Tabla 6. Distribución de la población según su edad y sexo.

Rango edad	Mujeres	Hombres	Total
No especificado	77	75	152
65 y mas	254	238	492
25-64	1065	973	2038
15-24	591	547	1138
0-14	1178	1187	2365
Totales	3165	3020	6185

Fuente. Comisión Nacional de Desarrollo de Pueblos Indígenas (CNDI), 2010.

4.8.2- Población.

De acuerdo con la delimitación que se hizo para nuestra zona de estudio comprende 4 localidades (**Tabla 7**).

Tabla 7. Distribución de la población ocupada por localidad según sexo.

Localidades	2005			2010		
	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total
San Miguel Acuexcomac	471	523	994	420	493	913
San Bernardino Tepenene	358	355	713	409	405	814
San José Texaluca	353	362	715	386	390	776
San Martín Tetéles	56	62	118	61	67	128
Total	1238	1302	2,540	1276	1355	2,631

Fuente. Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Principales resultados por localidad

(ITER).

4.8.3.- Vivienda.

En el área de estudio se tiene un registro de 666 viviendas para el 2010, de las cuales solamente 72 % contaban con todos los servicios como energía eléctrica agua entubada y drenaje. A pesar de su proximidad con el municipio de Puebla, aproximadamente el 78 % de las casas localizadas carecen de servicios básicos (**Tabla 8**).

Tabla 8. Indicadores de carencia de vivienda.

Localidad	Viviendas particulares habitadas 2010	Con piso de tierra	Sin electricidad	Sin agua entubada	Sin drenaje	Sin sanitario
San Miguel Acuexcomac	229	20	6	4	56	32
San Bernardino Tepenene	209	24	3	32	84	88
San José Tejaluca	192	9	3	142	46	46
San Martín Tételes	36	6	2	6	24	16
Total	666	59	14	184	210	182

Fuente. Elaboración propia a partir de INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

La carencia de estos indicadores reduce el bienestar de los ocupantes limitando sus actividades domésticas y familiares, con consecuencias para el ingreso del hogar, limitando el desarrollo integral de las comunidades. La ausencia de agua entubada perjudica la salud y potencia la presencia de enfermedades gastrointestinales, dérmicas y respiratorias, y la falta de energía eléctrica en la vivienda limita el uso de bienes y servicios tecnológicos que permiten la preparación y conservación de alimentos, así como el acceso a sistemas de información, comunicación y entretenimiento que repercuten en la calidad de vida. Asimismo, supone el uso de fuentes de energía que además de elevar los costos afectan negativamente al medio ambiente y la salud de los ocupantes (CONAPO, 2004).

4.8.4.- Educación.

A nivel nacional la población con rezago educativo se redujo de 23.7 millones de personas (20.7 %) de la población a 21.8 millones de personas (17.9 %) entre 2010 y 2015. Esta tendencia es consistente a lo largo de todo el periodo. En Puebla, para el 2015 la población con rezago educativo fue de 1361.1 miles de personas (21.9 %). De acuerdo con los indicadores de rezago social en el 2015 la población de 15 años o más analfabeta fue de 8.33 %, la población de 6 a 14 años que no

asistió a la escuela fue de 4.13 % y la población de 15 años y más con educación básica incompleta fue de 43.62 %.

De acuerdo con estimaciones de CONEVAL con base en los ITER (2000, 2005 y 2015), la educación Puebla presenta severos rasgos de educación básica. En el municipio de Tzicatlacoyan el porcentaje de población de 15 años o más analfabeta en el 2005 fue de 16.17 % y disminuyó a 12.76 % en 2010. El porcentaje de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela fue de 6.53 % a comparación de 4.61 % en el 2010 y el porcentaje de población de 15 años y más con educación básica incompleta fue de 74.64 % en 2005 y 67.48 % en 2010. En el área de estudio el porcentaje de población de 15 años o más analfabeta en el 2010 fue de 12.44 %, el porcentaje de población de 6 a 14 años que no asistió a la escuela fue de 5.63 % y la población de 15 años y más con educación básica incompleta fue de 82.83 %, como se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Distribución de la población.

Localidad	15 años o más analfabeta		6 a 14 años que no asiste a la escuela				15 años y más con educación básica incompleta					
	2005	2010	2005	2010	2005	2010						
San Miguel Acuexcomac	166	16.69%	140	15.36%	38	3.83%	5	0.55%	727	73.13%	664	66.77%
San Bernardino Tepenene	98	11.99%	75	9.17%	48	6.78%	74	9.03%	493	69.18%	441	61.90%
San José Tejaluca	118	15.16%	88	11.31%	72	10.13%	65	8.43%	620	86.65%	544	76.14%
San Martín Tetéles	24	18.75%	25	19.32%	-	0%	4	3.45%	83	70%	83	70.45%
Total	405		327		159		148		1922		1733	

Fuente. Elaboración propia con datos de INEGI (2015).

En el área de estudio encontramos un 20 % de la población mayor a 15 años que es analfabeta y comparándola con el censo del 2005, la población analfabeta ha mejorado aun cuando el porcentaje es alto ya que en comparación con el nivel nacional es del 12 %, aun así, la población en edad escolar ha aumentado, así como la asistencia de jóvenes a la educación media superior para todas las localidades.

4.8.5.- Salud.

Puebla ocupa el último lugar de las cinco entidades con mayor porcentaje de su población en situación de carencia en cuanto al acceso a los servicios de salud después de Michoacán (23.1 %), Estado de México (19.9 %), Veracruz (19.2 %), Ciudad de México (19.1 %) y Puebla (18.9 %). A nivel nacional la carencia por acceso a los servicios de salud mostró la mayor disminución, tanto en el porcentaje de la población como en el número de personas. Esta carencia se redujo de 33.5 millones de personas (29.2 %) de la población a 20.5 millones de personas (16.9 %) entre 2010 y 2015. A nivel municipal en Tzicatlacoyan el porcentaje de población sin accesos a servicios de salud disminuyó de 92.85 % en el año 2000 a 30.04 % en el año 2015. En el área de estudio solamente la localidad de San Miguel Acuexcomac cuenta con un centro de salud, esta es una unidad de consulta externa pertenece a la Secretaría de Salud (SSA), cuenta con las instalaciones y equipo para atender consulta general, farmacia, atención de partos y vacunación. Como se observa en la **Tabla 10**, la población que vive dentro del área de estudio ha aumentado de 2540 a 2631, y con ello, las personas que disponen de servicios de salud, tal es el caso, de la localidad de san Bernardino Tepenene que en 2005 tenía una población de 713 personas, de las cuales 620 personas (86.96 %), no contaban con derecho a los servicios de salud, y que en 2010 disminuyó a solamente 221 personas (28.48 %) (**Tabla 10**).

Tabla 10. Población sin derechos a servicios a salud.

Localidad	Población		Población sin derecho-habiencia a servicios de salud			
	2005	2010	2005		2010	
			%		%	
San Miguel Acuexcomac	994	913	80.78	803	50.05	457
San Bernardino Tepenene	713	814	86.96	620	61.55	501
San José Tejaluca	715	776	78.74	563	28.48	221
San Martín Tetéles	118	128	100	118	92.19	118
Total	2540	2631		2,104		1,297
Porcentaje	100	100		83		49

Fuente. Elaboración propia con datos de INEGI (2015).

CAPITULO V. METODOLOGÍA.

El procedimiento que se presenta describe los pasos seguidos en tres fases de trabajo:

- I.** Fase de Exploración.
- II.** Fase de Campo.
- III.** Fase de Integración.

5.1.- I. Fase de Exploración.

5.1.1- Recopilación y análisis de la información.

Se recopilaron tesis, artículos y estudios de académicos, así como informes de proyectos de investigación públicos y/o gubernamentales para entender el funcionamiento del medio natural, relacionados con los objetivos y el área de estudio. Se consultó, la página de la Comisión Nacional de Población (CONAPO) para conocer las características socioeconómicas del área de estudio, la información que se obtuvo fue grado de marginación de la población y la inequidad económica y social, esta última expresada por el índice de rezago social que está relacionado con la carencia de servicios básicos como disponibilidad de agua, drenaje, servicio sanitario, electricidad y la inaccesibilidad a servicios educativos y de salud, lo cual repercute en los ingresos percibidos por la población y en consecuencia en su bienestar. Además, se obtuvieron las normales meteorológicas a través de la página oficial www.smn.cna.gob.mx del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), también se utilizaron las cartas temáticas de INEGI que se descargaron a través de la página oficial www.inegi.com.mx en formato digital; Conjunto de datos Topográficos “San Francisco Teotihuacán” E14B15, Esc. 1:50,000; conjunto de datos edafológicos, Esc. 1:250,000, y conjunto de datos de vegetación y uso de suelo, Esc. 1:250,000, y por último se descargó la carta Geológica del Servicio Geológico Mexicano, Esc. 1:250,000. Se utilizó una Imagen satelital Landsat 8 OLI, para la evaluación de los niveles de erosión, con una resolución espacial de 30 m. la fecha de adquisición corresponde a la fecha del 11 de noviembre del 2015 (estación de fría-seca), obtenida de los archivos de la Serie Landsat a través del enlace del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) www.earthexplorer.usgs.gov, con un nivel de procesamiento L1 y libre de nubes. En la **Tabla 11** se observan los materiales cartográficos que se utilizaron para este estudio.

Tabla 11. Descripción de los materiales cartográficos.

No.	Tipo	Fuente	Descripción
1	Conjunto de datos Topográficos.	www.INEGI.com.mx	Carta “San Francisco Teotihuacán, E14B15”. Esc. 1:50,000.
2	Conjunto de datos de vegetación y uso de suelo.	www.INEGI.com.mx	Distribución de la vegetación natural e inducida. Esc. 1:250,000
3	Conjunto de datos edafológicos.	www.INEGI.com.mx	17 categorías basado en la textura.
4	Datos de precipitación.	www.smn.cna.gob.mx	Periodo de 10 años (2007-2016), Estación meteorológica “Balcón Diablo”.
5	Imagen satelital.	www.earthexplorer.usgs.gov	Landsat 8 OLI (Año 2015, resolución 30 m)

Fuente. Elaboración propia.

La imagen satelital Landsat 8 OLI se utilizó debido a que está disponible de forma gratuita, libre de nubes. Además de que ofrecen datos espaciales con una huella global que data desde 1972, un ancho de franja de barrido de 185 km adecuado para aplicaciones de mapeo de erosión a escala regional requerido para el monitoreo y la planificación de medidas de conservación de suelo para grandes áreas geográficas (Alejandro y Omasa, 2007), y además, tiene una resolución espectral de siete bandas, cada una registran la energía en las regiones del visible, infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo onda corta (SWIR), infrarrojo medio (MIR) y térmico TIR del espectro electromagnético, las cuales son apropiadas para mapear la erosión del suelo y el mapeo de vegetación periférica (Jensen, 2005) (**Tabla 12**).

Tabla 12. Landsat 8 OLI resolución espacial y espectral. Bandas 1 - 5 y 7 son frecuentemente utilizadas para el mapeo digital de suelos.

Banda	Resolución espacial (m)	Resolución espectral (μm)	Banda
1	30	450–515	BLUE
2	30	525–605	GREEN
3	30	630–690	RED
4	30	775–900	NIR
5	30	1550–1750	SWIR (MIR)
6	60	1040–1250	TIR
7	30	2090–2350	SWIR (MIR)
Pan	15	520–900	Visible + NIR

Fuente. Boettinger, *et al.*, (2008).

El procesamiento, análisis e integración de la información se realizó con el Sistema de Información Geográfica de uso libre *Quantum GIS versión 3.2.2 "Bonn"* (Quantum GIS Development Team, 2018). La imagen satelital Landsat 8 OLI se recortó de acuerdo con la delimitación del área de estudio, con el fin de hacer más eficiente los procesos de corrección y clasificación. El procesamiento comprendió los procesos relacionados con la corrección atmosférica, para ajustar y mejorar los valores radiométricos y la calidad de la imagen satelital. Posteriormente, se realizó una clasificación no supervisada para identificar la variabilidad espectral de los píxeles de la imagen satelital Landsat 8 OLI.

5.1.2.- Corrección atmosférica.

La radiación electromagnética se puede ver afectada por la dispersión de luz ocasionada por distintos componentes de la atmósfera, como; aerosoles, ozono, oxígeno y vapor de agua, lo cual modifica los valores de reflectancia de una superficie, disminuyendo el contraste de las imágenes (Chuvienco, 2002). La corrección atmosférica implica disminuir los efectos de la dispersión, absorción y refracción de la luz por las partículas atmosféricas (Chávez, 1996) y, por tanto, mejorar el contraste de las imágenes satelitales.

5.1.3.- Métodos de clasificación de imágenes satelitales.

Existen diversos métodos y algoritmos para mapear los usos y coberturas de la tierra, la técnica que se elija estará en función de las características espectrales y del tamaño de las diferentes coberturas presentes en el terreno (Vrieling, 2006). Los algoritmos se pueden clasificar en paramétricos o no paramétricos, ambos requieren la intervención del usuario en los datos de entrada para guiar al software en el procesamiento de la clasificación de las imágenes satelitales (Sepuru y Dube, 2017). Los algoritmos paramétricos utilizan matrices de media y varianza-covarianza para cada una de las categorías para determinar su límite de decisión entre las clases; mientras que, los algoritmos no paramétricos no hacen suposiciones sobre la distribución de los datos utilizados (Teskamichael, 2004).

5.1.3.1.- Clasificación no supervisada.

Los métodos de clasificación no supervisada consisten en agrupar píxeles con base en datos estadísticos, sin que el usuario intervenga en su formación (Chuvienco, 2002). Las técnicas de clasificación no supervisadas más comunes son *IsoData* y *K-means*, ambas técnicas distribuyen

uniformemente el espacio de datos y de forma iterativa agrupan los píxeles restantes usando la técnica de mínima distancia, por cada iteración, recalculan las medias de las clases y reclasifican los píxeles con respecto a las nuevas medias. Por ejemplo, el algoritmo de *IsoData* utiliza principalmente los valores de las medias para agrupar los píxeles en un determinado número de clúster, y el algoritmo *K-means* utiliza el umbral de desviación estándar o la distancia máxima de búsqueda para llevar a cabo la agrupación de los píxeles (Exelis Visual Information Solutions, 2018).

5.1.3.2.- Clasificación supervisada.

El método de clasificación supervisada es ampliamente utilizado para generar cartografía de uso de suelo y vegetación. La clasificación supervisada consiste en agrupar píxeles en un conjunto de datos en clases correspondiente a las clases de formación definidas por el usuario. Para definir las clases, el usuario debe realizar campos de entrenamiento en las áreas más representativas en función de los productos esperados. Las técnicas más comunes en la clasificación supervisada son: paralelepípedo, mínima distancia, máxima verosimilitud (Chuvieco, 2002). La técnica de paralelepípedo consiste en determinar los valores máximos y mínimos, determinados a partir de la media y la desviación estándar para cada clase por banda (Exelis Visual Information Solutions, 2018).

La clasificación por mínima distancia consiste en la determinación de las medias de cada clase y la asignación se realiza hacia la clase con menor distancia. Algunos de los píxeles quedarán sin clasificar si se introduce una distancia máxima o una desviación estándar máxima. La clasificación por máxima verosimilitud supone que las estadísticas para cada clase en cada banda se distribuyen de forma normal, se calcula la probabilidad de que un píxel dado pertenece a una clase específica. A menos que se selecciona un umbral de probabilidad, todos los píxeles serán clasificados y cada uno se asigna a la clase que tiene la probabilidad más alta (es decir, la máxima verosimilitud) (Exelis Visual Information Solutions, 2018).

5.1.4.- Índices de vegetación para el mapeo de la erosión del suelo.

Los índices de vegetación (VI) derivados de imágenes de satélite son unos de los principales enfoques de detección remota satelital para obtener información sobre la reflectancia de la superficie de la Tierra y se han utilizado como una técnica de extracción de características simples y rápidas para el mapeo de la erosión del suelo (Hochschild, 2003). Los índices de vegetación operan contrastando la intensa absorción del pigmento clorofílico en la región roja del espectro electromagnético frente a la alta reflectancia del mesófilo de la hoja en la región infrarroja del espectro electromagnético (Tucker, 1979).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los índices más ampliamente usados en los últimos años utilizados para el monitoreo, análisis y el mapeo temporal y espacial de las variaciones en la estructura vegetal como también de ciertos parámetros biofísicos que evalúan y monitorean los cambios en las propiedades biofísicas vegetales, tales como el índice de área foliar, crecimiento de las plantas y extracción de métricas fenológicas, porcentaje de cubierta vegetal, porcentaje de radiación fotosintéticamente activa y producción de biomasa. El NDVI se calcula utilizando la fórmula (Tucker, 1979), a partir de una transformación normalizada de las reflectancias de la banda 5 y 4 de la imagen satelital Landsat 8 OLI, que corresponden a la región del Infrarrojo cercano (ρ_{NIR}) y Rojo (ρ_{RED}) del espectro electromagnético, respectivamente.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

Esta transformación relativamente simple conduce a valores que varían de -1.0 a 1.0, este índice se relaciona positiva y linealmente con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación. Como resultado, aparecerán valores altos de NDVI cercanos a 1 para una vegetación saludable que crece vigorosamente debido a la baja reflectancia en el rojo (RED) y alta reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR), por otro lado, valores de NDVI cercanos o menores que 0 corresponde a afloramientos rocosos, suelos desnudos, agua nieve y nubes debido a que presenta una reflectancia creciente desde el visible al NIR. Donde valores moderados entre 0.2 a 0.3, representan arbustos y pastizales mientras que los valores altos 0.6 a 0.8 indican bosques tropicales templados y tropicales (Xie, Zhao, Wang, 2010; Hu, Ban, Luis y Zhuang, 2008; Merwan, Balevb, Dutob y Olivierb, 2014; Shikhar *et al.*, 2014).

A menudo, es útil normalizar los valores del NDVI para proporcionar un valor estimado del Porcentaje de Cobertura Vegetal (FVC, por sus siglas en inglés) (Zeng *et al.*, 2000). Cole y Boettinger (2007) utilizaron el FVC como una covariable ambiental para la estimación de la distribución de clases de suelo en los pastizales áridos de Wyoming, EUA. El FVC se refiere al porcentaje del área de proyección vertical de la vegetación (incluidas hojas, tallos y ramas) expresada en relación con una unidad de área, con el propósito de la detección remota se refiere al área de un píxel de una imagen satelital (Boettinger *et al.*, 2008). El FVC se calculó utilizando la siguiente función matemática de (Zeng *et al.*, 2000):

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}$$

Donde $NDVI_S$ y $NDVI_V$ corresponden a valores representativos de NDVI para suelo desnudo ($FVC = 0$) y vegetación verde muy densa ($FVC = 1$), respectivamente. El FVC desempeña un papel importante en los ciclos climáticos e hidrológicos y procesos geoquímicos (Jiang *et al.*, 2006), es un parámetro importante para describir la calidad de la vegetación y el cambio de los ecosistemas. Además, se utiliza en aplicaciones de agricultura, monitoreo de sequía, evaluación ambiental y evaluación del riesgo de erosión (Zhang *et al.*, 2010). Por ejemplo, la cubierta vegetal es uno de los parámetros más comunes utilizados en la evaluación de la relación entre la vegetación y la erosión del suelo, en general, la erosión del suelo disminuye con un aumento de la cobertura vegetal (Wen, Lees, Jiao, Lei y Shi, 2010). Por lo tanto, la estimación exacta y oportuna de FVC a gran escala usando datos de la detección remota satelital es de gran importancia para muchas aplicaciones relacionadas con la superficie terrestre. Por ejemplo, las evaluaciones de conservación del agua y del suelo requieren una alta resolución espacial y temporal de datos del FVC (Zhang *et al.*, 2014). Hochschild *et al.* (2003) mapeo los diferentes tipos de erosión y su extensión al crear una correlación negativa entre los niveles de erosión y el porcentaje de cobertura vegetal. Además, clasificó y describió los procesos de erosión laminar y en cárcavas en la cuenca del río Mbuluzi (**Tabla 13**).

Tabla 13. Clasificación de las clases e intensidades de erosión con respecto al porcentaje de cubierta vegetal.

Clase	Erosión	Clase de erosión	% Cubierta vegetal	Áreas degradadas
1	Ninguno.	No perceptible.	>90	<10
2	Ligera.	laminar y en surcos	>75	<25
3	Moderada.	en surcos.	>75	<25
4	Fuerte.	En surcos y cárcavas profundas.	51–75	25-49
5	Severa.	En surcos profundos y cárcavas profundas.	25–49	50-74
6	Muy severa.	Cárcavas profundas y movimientos en masa.	<25	>75

Fuente. Hochschild *et al.*, (2003), modificado de Van Zuidam, (1985).

A partir del FVC, Hochschild *et al.*, (2003) determino 6 clases de erosión: ninguna, leve, moderada, fuerte, severa y muy severa, respecto a la descripción de los procesos de erosión y la información derivada de imágenes satelitales. De esta manera, la cubierta vegetal se ha utilizado como uno de los indicadores biofísicos más importantes para la detección de la erosión del suelo, lo que permite la delimitación de la distribución de la vegetación y el suelo basado en patrones de reflectancia característicos de la vegetación verde (Hochschild *et al.*, 2003).

5.2.- II. Fase de Campo.

Consistió en recorridos dentro del área de estudio, selección y descripción cualitativa de los sitios de observación principalmente de las condiciones naturales del entorno como relieve, material parental, vegetación, porcentaje de cobertura vegetal, uso de suelo, grado de influencia humana, y características y propiedades de los suelos como profundidad, afloramientos rocosos, porcentaje en rocas, piedras y gravas en superficie, a fin de conocer de forma general el grado de deterioro de los suelos y del entorno.

5.2.1.- Descripción de las condiciones del entorno.

El trabajo de campo consistió en un recorrido general por el área de estudio en la época de lluvia y de seca, a fin de conocer de forma general el grado de deterioro de los suelos y del entorno, la importancia de realizar los recorridos en dos estaciones del año es con el fin de tener en cuenta los principales cambios en el contenido de humedad en el suelo y los cambios en la cobertura vegetal, ya que son diferentes en cada estación. Los recorridos de campo permitieron identificar los sitios donde las condiciones naturales presentan indicadores que demuestran el estado de

conservación del sitio en cuestión, y otros sitios se seleccionaron de acuerdo con los diferentes grados de erosión del suelo.

El muestreo se realizó de manera aleatoria, siguiendo el criterio Genético-geográfico (Belobrov *et al.*, 1980), donde se vinculan las condiciones de cada lugar con la aparición de tipos genéticos de suelo en el paisaje y siguiendo ciertos lineamientos en las unidades morfoedafológicas, caracterizadas por el relieve (alomado, ondulado, llano, etc.), material parental, vegetación y uso de suelo y grado de influencia humana.

Se tomaron en cuenta las siguientes propiedades y características internas de los suelos para la caracterización de la cobertura edáfica (Ruiz *et al.*, 1999):

- a) Profundidad.
- b) Tipo de formación.
- c) Afloramientos rocosos.
- d) Porcentaje en rocas, piedras o gravas en la superficie.
- e) Contenido en rocas, piedras o gravas al interior del perfil.
- f) Características del drenaje interno.

Sobre las condiciones existentes en el entorno se tiene la siguiente información:

- a. Características del relieve.
 - Forma del relieve (llano, ligeramente ondulado, ondulado, alomado).
 - Pendiente (Porcentaje de inclinación de la pendiente).
 - Largo de laderas.
- b. Material parental.
- c. Vegetación y porcentaje de cobertura vegetal.
- d. Uso de suelo
- e. Características del drenaje externo
- f. Tipo de influencia humana

Además, la evaluación de los diferentes grados de erosión de suelos, se documentaron respecto a las características de cada unidad con una fotografía. Para la verificación de las unidades de suelos

y evaluación del entorno se utilizó el Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno (Ruiz *et al.*, 1999).

5.2.1.1.- Relieve

El relieve constituye uno de los factores más importantes para tener en cuenta, desde el punto de vista de la formación del suelo, esto determina la profundidad y la fertilidad, y desde el punto de vista agrícola influye en la distribución y retención de la humedad y, por tanto, en los rendimientos de las cosechas. Por consiguiente, la descripción de este factor puede revelar elementos útiles para el manejo y la conservación de los suelos. Para la clasificación del tipo de relieve, elemento que define los contornos, se tomaron en cuenta cuatro categorías, establecida por el grado de pendiente y largo de la ladera (Ruiz *et al.*, 1999):

- I. **Llano.** En este la mínima pendiente que pudiera existir no afecta la distribución del agua en el perfil ni en el área, indica la posibilidad de ampliar sin limitaciones maquinaria agrícola en la preparación del suelo, la siembra, labores culturales y la cosecha, exceptos en los casos de suelos muy plásticos.
- II. **Ligeramente ondulado.** Son elevaciones cuyas laderas poseen una longitud menor a los 60 metros y sus pendientes no exceden de 10 %.
- III. **Fuertemente ondulado.** Formado por elevaciones cuyas laderas miden entre 80 y 100 metros de largos y sus pendientes son superiores a 20 %. El drenaje interno y externo suele ser drenado o muy drenado.
- IV. **Alomado.** Está constituido por elevaciones cuyas laderas tiene, desde la base hasta la cima, un largo comprendido entre 100 y 500 metros y pendientes generalmente superiores a 20 %. En este relieve, el drenaje tanto interno como externo es considerado como drenado, con alto riesgo de erosión.

5.2.1.2.- Material parental

Material parental, comprende los materiales originales que se componen de material mineral u orgánico, o por una mezcla de ambas, el material mineral comprende rocas de diversos sedimentos no consolidados. Las rocas pueden ser ígneas, metamórficas o sedimentarias. Sin embargo, no hay mucha relación entre la naturaleza de la roca y los que se desarrolló a partir de

estas. Un solo tipo de roca puede originar diferentes tipos de suelo, dependiendo de la naturaleza de otros factores formadores del suelo como el clima (Ruiz et al., 1999).

5.2.1.3.- Vegetación y uso de suelo

La vegetación indica la capacidad de una parcela para posibles usos alternativos, y las correlaciones entre plantas y suelos. Además, pueden ser guías inestimables para la distribución del suelo (Ruiz et al., 1999).

- I. **Vegetación natural o secundaria.** Cuando se describe la vegetación natural, conviene citar las especies arbóreas y arbustivas asociadas alrededor de un área de muestreo razonable alrededor del sitio, y el estado en el en que se encuentran: conservada, alterada o muy alterada.
- II. **Uso de suelo.** Determina en primer lugar el espacio utilizado. El uso del suelo se describe frecuentemente en términos generales como agricultura, pastoreo, ganadería, interesa saber hasta qué grado las áreas son ocupadas para la explotación agroforestal, silvopastoril o forestal, y si la utilidad agrícola es: intensiva o extensiva.

5.2.1.4.- Consideraciones sobre la influencia humana en el entorno

Al evaluar las consideraciones del entorno uno de los aspectos más importante es el impacto del hombre en el medio como consecuencia de las actividades agrícolas forestales o pecuarias, fundamentalmente, la influencia humana sobre el entorno se clasifica (Ruiz *et al.*, 1999):

- I. **Influencia humana nula:** es típica de bosques primarios y secundarios en lo que el hombre no ha perturbado el medio o bien su influencia es atenuada por la recuperación natural, es posible encontrar tales ecosistemas en zonas apartadas, donde la densidad de población es baja y la presión sobre los recursos naturales es muy poca.
- II. **Influencia humana moderada** ocurre principalmente en agroecosistemas o ecosistemas naturales donde la influencia del hombre es limitada. En este caso, es posible la regeneración natural. Evaluamos esta categoría cuando se comprueba la existencia del horizonte A en los suelos o bien una pérdida poco significativa de este. En cuanto la vegetación natural y los cultivos agrícolas, estos no presentan características de deterioro.

- III. **Influencia humana fuerte.** En este caso el hombre realiza sus actividades sin tener en cuenta las condiciones del medio: ocurre en sectores con relieve accidentado y se detecta al describir el perfil de suelo por la falta total de horizonte A y parte del B, además la vegetación natural es muy escasa y los cultivos presentan un aspecto pobre.
- IV. **Influencia humana muy fuerte.** Ocurre con mucha frecuencia en zonas donde las pendientes son pronunciadas, las precipitaciones abundantes y los suelos muy susceptibles a la erosión. El hombre, haciendo caso omiso del frágil equilibrio ecológico presente, la tala y el cultivo desencadena un proceso erosivo sin precedentes. En esta categoría se llega a la pérdida total del horizonte A y la pérdida casi total del horizonte B, la vegetación primaria desaparece y los cultivos, en caso de que existan, se ven muy degradados.

5.2.1.5.- Drenaje externo

El drenaje externo está relacionado con la circulación de agua por la superficie del terreno, lo cual depende de varios factores relacionados entre sí, como el contenido y el tipo de arcillas y el relieve, tales elementos pueden representar limitantes para la agricultura. En los suelos con alto contenido en arcilla dilatante, situado en posiciones bajas del relieve o valles cerrados en la estación de humedad se acumula un exceso de agua en la superficie y los cultivos sufren de asfixia, además se presentan dificultades en las labores culturales, en este criterio se toman en cuenta cinco factores (Ruiz et al., 1999):

- I. **Drenaje impedido.** Es cuando el agua no circula y en la época de lluvias el suelo está inundado; estas zonas están ocupadas por pantanos o bien son áreas costeras y de presionales donde la explotación agrícola está restringida al cultivo de pastos y arroz. En estas áreas se requiere de grandes obras de desagüe para facilitar la agricultura.
- II. **Escasamente drenado.** En este caso el suelo tiene dificultad para evacuar el exceso de agua. esta no permanece estancada de forma permanente y la agricultura se puede practicar por más de seis meses consecutivos. Sin embargo, es necesario realizar obras de drenaje para facilitar la agricultura todo el año.
- III. **Moderadamente drenado.** En este caso la evacuación es imperfecta, el agua se estanca dificultando la agricultura en los momentos de grandes lluvias.

- IV. **Drenado.** El agua no se estanca. Aun en la época de lluvia la evacuación de las aguas es continua y los cultivos no resultan afectadas; después de finalizadas las lluvias, no se aprecian charcos en la superficie del terreno.
- V. **Muy drenado.** Es típico de zonas de sierras o lomeríos con pendientes moderadas donde el agua circula con rapidez y provoca el arrastre de partículas del suelo; este después de la lluvia se seca con relativa facilidad. Este drenaje, está relacionado con zonas de montaña cuyas pendientes son muy fuertes y el agua, al caer, alcanza grandes velocidades y arrastra las partículas más finas del suelo, provocando erosión en surcos y cárcavas donde las áreas del suelo este desprotegido.

5.2.1.6.- Grado de erosión

El grado de erosión es la magnitud que el proceso erosivo alcanza en un punto o un momento determinado (Riverol, 1989). La clasificación de grados de erosión (MINAGRI, 1982), se modificó de acuerdo en contornos previamente aplicados a las zonas de estudio dentro del estado de Puebla, México (Ruiz, Riverol, Castelán, Torres, Martínez, 2004a), en la cual se establecieron 6 categorías de erosión para determinar la pérdida del suelo (**Tabla 14**).

Tabla 14. Clasificación de los grados de erosión.

Grado de erosión	Pérdidas
Leve	Pérdida del 25 % horizonte A.
Moderada	Pérdida del 75 % horizonte A.
Fuerte	Pérdida total horizonte A y 25 % del horizonte B.
Muy fuerte	Pérdida total horizonte A y 75 % del horizonte B.
Severa	Pérdida total horizontes A y B, aflora horizonte C.
Muy severa	Pérdida total A, B y C, aflora la roca.

Fuente. Ruiz et al., (1999).

De acuerdo con la descripción el grado de erosión (Belobrov, 1980) citado por Ruiz *et al.*, (1999), cuando no se aprecia la pérdida del horizonte superficial, ni cambios en la coloración, textura o estructura de la superficie del suelo, el grado de erosión se clasifica como nulo. El grado de erosión es leve, cuando la pérdida del suelo es parcial, afectando menos del 25 % del horizonte A. El grado de erosión moderado representa la pérdida del 75 % o más del horizonte A. El grado de erosión fuerte se aplica a los suelos que han perdido el horizonte A totalmente y al menos el 25 % del

horizonte B y muy fuerte cuando la pérdida total de horizonte A y pérdida parcial del horizonte B es hasta un 75 % o más (Ruiz et al., 1999).

5.2.1.7.- Afloramientos rocosos

Los afloramientos rocosos y grandes muros rocosos son factores limitantes del uso del suelo de una región. Es difícil distinguir separadamente uno de otro, de manera que hay que estudiarlos juntos. El porcentaje de afloramientos rocosos alrededor del sitio se calcula con la observación de fragmentos rocosos en la superficie, lo cual contempla 4 elementos. 1) Gravas cuyo tamaño está considerado inferior a 7.5 cm, considerando la distancia en los extremos mayores. 2) Piedras, que miden entre 7.5 y 25 cm, y 3) las rocas todas a aquellas mayores a 25 cm, considerando sus dos aristas más distantes entre sí, y 4) los Guijarros, estos cuerpos son duros y de formas redondeadas u ovaladas, el porcentaje de afloramientos rocosos es un indicador de los procesos erosivos (Ruiz *et al.*, 1999).

5.2.1.8.- Drenaje interno

El drenaje interno se refiere a la circulación del agua de infiltración, en función de la permeabilidad de los horizontes, a través de las diferentes capas que conforman el perfil de suelo. La velocidad depende fundamentalmente de cuatro factores: el contenido y tipo de arcilla, el grado de estructuración del suelo, la presencia de capas compactas y el menor y mayor grado de erosión del suelo (Ruiz *et al.*, 1999):

- I. **Escasamente drenado.** Por las mismas razones que el anterior, el suelo no infiltra con facilidad, sin embargo, el agua se mantiene menos tiempo cubriendo el suelo.
- II. **Moderadamente drenado.** Cuando el agua se infiltra sin grandes tropiezos a través del suelo, el drenaje no es un factor que perjudique seriamente a los cultivos.
- III. **Drenado.** Ocurre en suelos con un contenido media o alto en arcillas, del tipo hidrofílicas; no presentan limitaciones en cuanto al drenaje.
- IV. **Muy drenado.** Cuando existe dominio de las fracciones gruesas y los poros del suelo son grandes o medios, el agua se infiltra rápidamente.
- V. **Excesivamente drenado.** Es típico de los suelos de textura arenosa, con bajos o nulos contenidos de arcillas; generalmente no son aptos para la agricultura.

5.3.- III. Fase de Integración.

Durante esta fase, se integró la información recabada durante la Fase I de exploración y Fase II de campo; las distintas coberturas edáficas se clasificaron de acuerdo con el relieve, grado de erosión, proceso de erosión dominante, vegetación y uso de suelo, NDVI, porcentaje de cubierta vegetal, porcentaje de rocas piedras o gravas, drenaje externo, tipo de influencia humana y medidas de manejo y conservación para cada cobertura edáfica, y posteriormente un mapa donde se observa la distribución espacial de los procesos y niveles de erosión categorizados en coberturas edáficas con el objetivo de proponer medias de uso y manejo, protección y restauración de suelo.

5.3.1.- Clasificación y distribución de las coberturas edáficas.

La clasificación de las coberturas edáficas se realizó de acuerdo con los indicadores y factores ambientales que controlan la erosión del suelo de manera que pueda ser utilizados para la caracterización y evaluación de los procesos y niveles de erosión en las distintas coberturas edáficas. La generación del mapa de cobertura edáfica se realizó con el fin de determinar la distribución espacial de la magnitud e intensidad de los procesos erosivos y niveles de erosión en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla, partir del procesamiento e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 OLI y la descripción de los indicadores y factores ambientales que controlan la erosión del suelo, con el objetivo de implementar medidas de uso y manejo, conservación, protección y restauración del suelo.

5.3.2.- Propuestas de uso y manejo sustentables establecidas en este trabajo.

Para realizar un manejo y uso conservacionista de los predios o parcelas, los productores que viven en las comunidades de riesgo de erosión tienen que asumir el trabajo de conservación como propio y se deben organizar para desarrollar un programa de actividades de forma conjunto, donde se combinen a la vez los intereses de la producción y la conservación de las tierras, procurando cambiar la visión tradicional que ha regido la práctica agrícola actual. Es decir, quien trabaje la tierra debe entender su compromiso por disminuir las pérdidas de suelos por efecto de la erosión y minimizar los daños ocasionados por su manejo. Para lograr este objetivo existe diversa opción técnicas, según Viera, Cubero, Azofeita (1996) se agrupan de la siguiente forma.

- Practicas agrotécnicas o vegetativas
- Practicas mecánicas

- Practicas mejorativas

5.3.4.1.- Practicas agrotécnicas o vegetativas.

Las practicas agrotécnicas o vegetativas son aquellas que se realizan en el campo al cultivar especies vegetales para proteger al suelo de los efectos de las precipitaciones y que impiden el golpeteo directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, evitando que las partículas sean arrastradas por los escurrimientos superficiales, a las plantas cultivadas, con este fin se conoce como cultivo de cobertura que tiene la finalidad de proteger el suelo desde un punto de vista físico. Cuando estas plantas se entierran se denominan abonos verdes, en este caso tiene la finalidad de mejorar la fertilidad y la estructura del suelo, en la actualidad se conceptúa como tal la utilización de plantas en rotación, sucesión y asociación con cultivos comerciales, incorporándolos al suelo o dejando en superficie ofreciendo protección, ya sea cómo mantenimiento o recuperación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo.

5.3.4.2.- Manejo de coberturas con el uso del abonado verde.

Es una práctica elemental dentro de un sistema integral para el manejo de los suelos degradados o en procesos de degradación por erosión, los productores pueden utilizar varias especies de cultivos de abonos verdes con resultados satisfactorios tanto para la conservación, como para el mejoramiento de los suelos, con un manejo adecuado de las prácticas es posible incrementar la economía.

Cualquier especie vegetal que forme una buena cubierta de follaje sobre el terreno puede usarse como cultivo de cobertura, entre ellas se destacan los pastos, leguminosas y plantas de bajo porte. Sin embargo, se debe procurar seleccionar especies perenes o de ciclos cortos en dependencia del cultivo que se utilice, de habito rastrero, crecimiento rápido y follaje denso, adaptadas a las condiciones ecológicas locales y que compitan lo menos posible con el cultivo principal.

5.3.4.3.- Practicas mecánicas

Con la finalidad de disminuir los escurrimientos superficiales y reducir las pérdidas de suelo en los terrenos con pendientes se realizan prácticas mecánicas, las cuales pueden construirse con implementos agrícolas de tracción animal, mecánica o simplemente de manera manual con el

auxilio de picos, palas, coas y otros implementos agrícolas. La construcción de estas está dependerá del grado de erodabilidad que tengan los suelos y la pendiente de la ladera.

La siembra en contorno se realiza al trazar surcos siguiendo curvas en nivel y constituye la base fundamental para el establecimiento y desarrollo de cualquier medida, al sembrado y cultivar sobre esta curva cada hilera de plantas forma un obstáculo al arrastre del suelo por el agua escorrentía, ya que el camellón levantado con el arado forma una barrera que impide la libre circulación del agua de lluvia, sin embargo, cuando la pendiente es superior al cinco por ciento no es suficiente para evitar el arrastre del suelo por las aguas de escorrentía, por ellos es necesario combinarla con otras prácticas mecánicas como barreras vivas y muros de contención, para que el sistema sea eficiente.

5.4.- Análisis estadísticos.

Nivel de significancia

El nivel de significancia establece un criterio para el rechazo o aceptación de la hipótesis nula, es decir, es el nivel máximo aceptable de riesgo de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera (error tipo I). Se fija, *alpha* en este trabajo con un valor de $\alpha = 0.05$.

Estadístico de prueba

El estadístico de prueba es el estadístico F, a partir de su distribución de probabilidad, puede obtenerse la probabilidad empírica (Sig. o valor de p de cometer el error de tipo I).

5.4.1.- Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA es una herramienta estadística que analiza la varianza de un factor para una variable dependiente cuantitativa. Esta técnica es una extensión de la prueba *t student* para dos muestras (IBM Corp, 2015), y nos permite también, saber si el grado de variabilidad de las muestras ha contribuido a las diferencias en las medias de la población de interés.

Los supuestos que deben cumplirse para poder aplicar el ANOVA son:

- El factor es una variable cualitativa y se codifica con números enteros y la variable dependiente es cuantitativa (nivel de medición de intervalo) y toma valores en los números reales.
- Las observaciones son independientes

- La variable dependiente se distribuye normal dado que en el modelo se ha supuesto normalidad en los errores aleatorios. Este supuesto puede comprobarse con la prueba de hipótesis de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro.
- Las varianzas de la variable dependiente en los grupos que se comparan son aproximadamente iguales u homogéneas. Este supuesto se conoce como homocedasticidad y puede utilizarse la prueba de hipótesis de Levene (test F que compara las varianzas) para su comprobación.

5.4.2.- Prueba Chi cuadrada.

La prueba Chi-Cuadrado se usa para determinar si existe una relación significativa entre dos variables nominales (categóricas). La frecuencia de la primera categoría nominal se compara entre las categorías de la segunda variable nominal con el fin de cuantificar las diferencias entre las frecuencias observadas en cada clase y las esperadas, partiendo de la hipótesis nula de que los datos se ajustan a una distribución normal. Para su aplicación, en las n clases existentes, se contabiliza el número de casos observados (O_i) y, a través de la función teórica que se desea testar, se calcula el número de casos esperados (E_i). A partir de estas frecuencias se calcula el valor del estadístico X^2 , con la siguiente fórmula:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Posteriormente, se calculan los grados de libertad, restando un grado de libertad para cada parámetro de población que tenga que ser estimado de los datos de la muestra ($k-1$). Una vez determinados los grados de libertad y el valor X^2 , se busca en la tabla de distribución de chi cuadrada, el valor de X^2 crítico, para un nivel de significación elegido (generalmente $\alpha = 0.05$).

La prueba de hipótesis es, si X^2 crítico es mayor que X^2 calculado se acepta la hipótesis nula de que son homogéneas, mientras que, si X^2 crítico es menor que X^2 calculado, la hipótesis se rechaza. Sin embargo, la mayoría de los programas estadísticos calculan directamente el valor p, por lo que si el valor de p es menor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) la hipótesis se rechaza.

CAPITULO VI. RESULTADOS.

6.1.- Fase I. Exploración.

6.1.1.- Corrección atmosférica.

La corrección atmosférica se aplicó de manera automática a todas las bandas de la imagen satelital Landsat 8 OLI, mediante el método de corrección atmosférica DOS (*Dark Substration Objetc*) propuesto por Chávez, (1996) para corregir el aporte de la radiancia atmosférica. A partir del complemento *Semi-Automatic Classification Pluggin SCP v 5.3.6* del Sistema de Información Geográfica *Quantum GIS versión 3.2.2 "Bonn"* (Quantum GIS Development Team, 2018). Este método consistió en sustraer el valor mínimo del valor del nivel digital del píxel (i, j) de la banda K de la imagen satelital (Chuvieco, 2002), es decir, asume que los objetos oscuros no reflejan luz. Por ejemplo, las partes más oscuras de una imagen satelital (agua limpia, profunda y/o en calma) deberían tener una reflectancia cercana a cero independientemente de la longitud de onda, por lo tanto, en la corrección atmosférica cualquier valor mayor que cero debe ser el resultado de los diferentes mecanismos de dispersión de la radiación atmosférica, provocado por aerosoles, vapor de agua, partículas de polvo, etc. La **Figura 4** muestra la imagen satelital con el proceso de corrección atmosférica, lo cual disminuyó considerablemente los efectos de bruma y nubosidad, además, de aumentar el contraste y el brillo.



Figura 4. Imagen satelital corregida atmosféricamente, el polígono rojo delimita el área de estudio. Fuente. Elaboración propia.

6.1.2.- Clasificación de la imagen satelital.

Existen diversos métodos y algoritmos para mapear los usos y coberturas de la tierra, la técnica que se elija estará en función de las características espectrales y del tamaño de las diferentes coberturas presentes en el terreno (Chuvieco, 2002). Debido a la gran heterogeneidad de las distintas cobertura en el área de estudio; vegetal (vegetación secundaria arbórea de bosque encinos, vegetación arbustiva, cultivos, pastizales), cuerpos de agua, afloramientos rocosos, área urbana, carreteras y caminos se optó por una clasificación no supervisada, mediante el complemento *Semi-Automatic Classification Pluggin SCP v 5.3.6* del Sistema de Información Geográfica *Quantum GIS 3.2.2 version "Bonn"* (Quatum GIS Development Team, 2018), se realizó la clasificación no supervisada utilizando el algoritmo *K means*, con el propósito de identificar el grado de agregación de los pixeles de la imagen satelital Landsat 8 OLI, a partir de la generación de la combinación de las bandas: 5 (infrarrojo cercano), 4 (visible rojo) y 3 (visible verde), con dos iteraciones y 5 clases.

El proceso de clasificación no supervisado se ejecutó con la combinación de bandas 5, 4, 3 que corresponden a la región Infrarroja y visible del espectro electromagnético, esta combinación, se realizó con el fin de resalta la alta reflectividad de la vegetación en la región infrarroja, que contrasta los fragmentos de vegetación arbóreas y arbustiva con diferentes tonalidades de rojo, esto con base en los resultados con éxito para discriminar áreas erosionadas, estables y deposicionales usando la bandas infrarroja, rojo y verde de las imágenes satelitales Landsat MSS (Pickup y Nelson, 1984). Además de la reflectancia espectral de los suelos, la separación espectral de otras características de la superficie contribuye a la discriminación de los suelos erosionados, debido a que tiene propiedades espectrales más complejas que el suelo (De Asis y Omasa, 2007).

En cuanto a la selección del número de categorías o clases de análisis se determinaron, principalmente, en función de:

- a) La problemática por estudiar: disminución o pérdida de la cobertura edáfica, resultado de la sustitución o reemplazo de las coberturas vegetales y usos del suelo
- b) Los recorridos en campo (vegetación y uso de suelo, afloramientos rocosos, grados de erosión, áreas urbanas, carreteras y caminos).
- c) Las posibilidades de discriminación que tiene el productor, respecto de las coberturas y usos del suelo durante el proceso de interpretación de las imágenes.

La interpretación más relevante debe ser dada por un experto reconocedor del área de estudio con la habilidad para interpretar imágenes satelitales, cuya finalidad consiste en la asignación de nombres reales a cada una de las clases. Es decir, en base a los resultados de la clasificación no supervisada y la experiencia del experto, se verifica el tipo y uso que se le está dando a cada una de las clases encontradas y realizar el etiquetado definitivo de las clases. A partir de estos resultados, se categorizaron las siguientes clases: Cobertura edáfica ligeramente degradada (CE_L), Cobertura edáfica moderadamente degradada (CE_M), Cobertura edáfica fuertemente degradada (CE_F), Cobertura edáfica severamente degradada (CE_S) y Cobertura edáfica muy severamente degradada (CE_MS) (**Tabla 15**).

Tabla 15. Resultados de la clasificación no supervisada.

Cobertura edáfica	No. de píxeles	Área (ha)	Área (%)
Ligeramente degradada	4804	433.35	13.95
Moderadamente degradada	5957	535.84	17.25
Fuertemente degradada	6675	603.81	19.43
Severamente degradada	5492	492.64	15.86
Muy severamente degradada	11624	1041.5	33.52

Fuente. Elaboración propia.

Después de la finalización del proceso de clasificación no supervisado, cada una de las clases espectrales se clasificó en cada una de las cinco coberturas edáficas dando como resultado una imagen homogénea (**Figura 5**). La cobertura edáfica ligeramente degradada cuenta con una superficie total de 433.35 ha, la cobertura edáfica moderadamente degradada con 535.84 ha, la cobertura edáfica fuertemente con 603.81 ha, la cobertura edáfica severamente con 492.64 ha y la cobertura edáfica muy severamente degradada con 1041.5 ha.

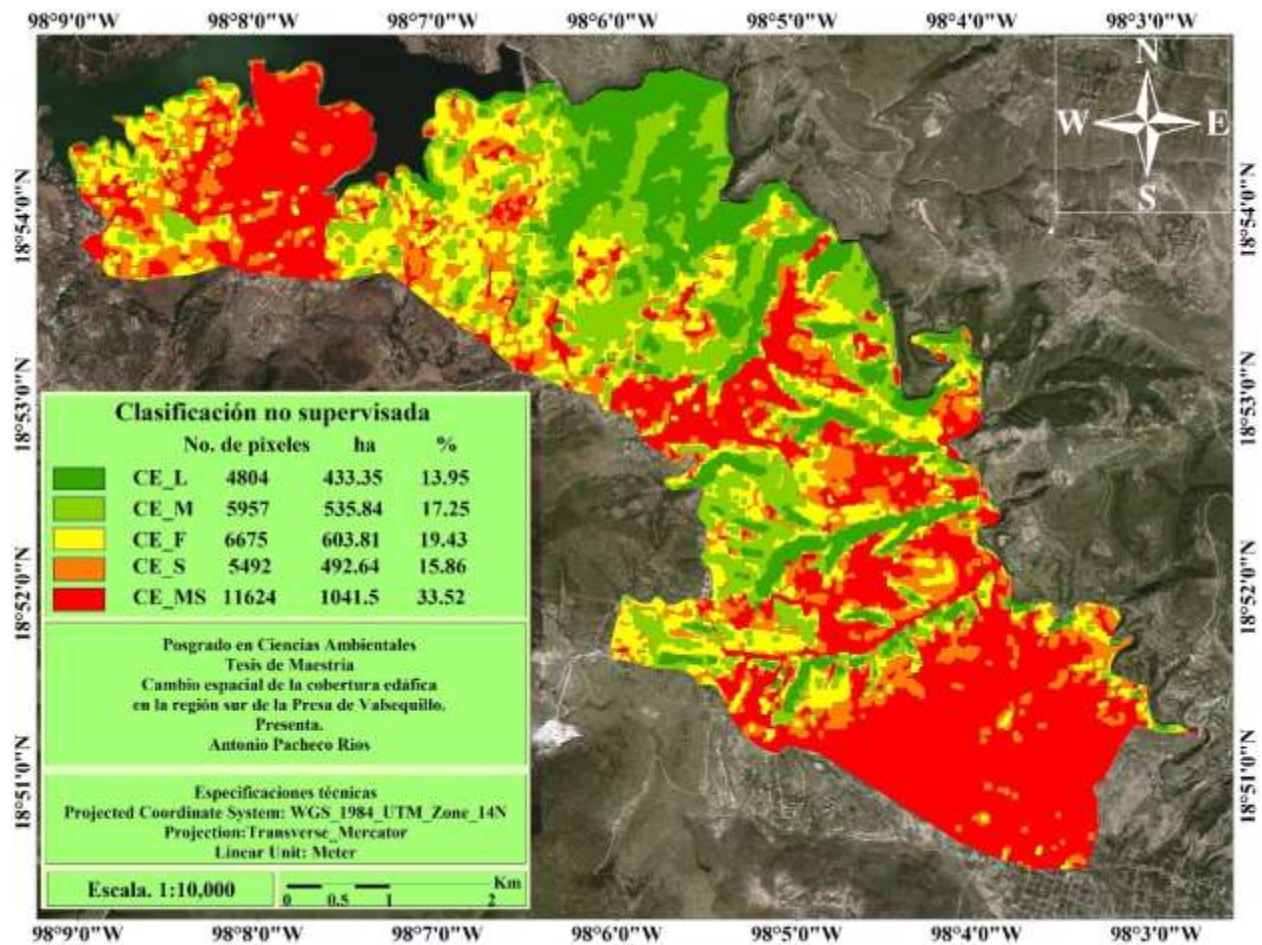


Figura 5. Resultado de la clasificación no supervisada. Fuente. Elaboración propia.

6.1.3.- Índice de vegetación normalizada (NDVI).

El NDVI se calculó con la herramienta *Raster calculator* del Sistema de Información Geográfica *Quantum GIS versión 3.2.2 “Bonn”* (Quantum GIS Development Team, 2018). La calculadora ráster permitió realizar operaciones matemáticas en cada píxel de las bandas 5 y 4 de la imagen satelital Landsat 8 OLI, usando la ecuación Rouse *et al.*, (1974), que corresponde a la región infrarroja y roja del espectro electromagnético, respectivamente.

$$NDVI = \frac{\rho(Banda\ 5) - \rho(Banda\ 4)}{\rho(Banda\ 5) + \rho(Banda\ 4)}$$

En los resultados de los valores del NDVI en la cobertura edáfica ligeramente degradada varía de -0.48 a 0.85, con una media de 0.68 ± 0.092 , en esta cobertura edáfica la vegetación está constituida por comunidades secundarias arbóreas de bosque encino, este valor promedio del NDVI coincide con el rango de 0.6 y 0.8 propuesto por Xie *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2008; Merwan *et al.*, 2014; Shikhar *et al.*, 2014 que corresponde a bosques templados. Sin embargo, de acuerdo con los recorridos de campo, se observó que la vegetación se encuentra perturbada debido a las actividades humanas (Ruiz, Tamariz, Castelán y Calderón, 2013). La cobertura edáfica moderadamente degradada muestra que el NDVI varía de 0.16 a 0.82, con una media de 0.60 ± 0.09 , en esta cobertura edáfica el suelo está cubierto por vegetación arbórea y arbustiva poco densa; sin embargo, esta vegetación se ha encargado de detener los procesos de erosión y bajo estas condiciones el suelo se va recuperando lentamente (Ruiz *et al.*, 2004). La cobertura edáfica fuertemente degradada muestra valores de NDVI que varían de 0.17 a 0.79, con una media de 0.49 ± 0.08 , en esta cobertura edáfica, la vegetación se asocia a una transición progresiva entre las comunidades arbóreas y arbustivas secundarias, pastizales, cultivos y áreas abandonadas. La cobertura edáfica severamente degradada muestra valores que varían de 0.15 a 0.75, con un valor promedio de 0.43 ± 0.09 , esto representada una cubierta vegetal compuesta por vegetación arbustiva secundaria fragmentada y pastizales y corresponden a tierras abandonadas. Por último, la cobertura edáfica muy severamente degradada muestra valores del NDVI entre -0.31 a 0.81, con una media de 0.32 ± 0.10 , en esta cobertura edáfica la vegetación está compuesta por algunas comunidades arbóreas aisladas, vegetación arbustiva fragmentada, pastizales, suelos erosionados y afloramientos rocosos. Aunque, el valor promedio del NDVI en esta cobertura se encuentra en los rangos de 0.20 a 0.30, propuestos por Xie *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2008; Merwan *et al.*, 2014;

Shikhar *et al.*, 2014, asociados a una vegetación arbustiva y pastizales. El NDVI permitió diferenciar distribución espacial de la vegetación arbustiva y los pastizales de los suelos erosionados y afloramientos rocosos, debido a que en esta cobertura edáfica se han desarrollado procesos de erosión laminar, en surcos y cárcavas muy intensos, los cuales se ven con valores muy iguales y mayores a cero (**Tabla 16**).

Tabla 16. Estadística descriptiva del NDVI.

Cobertura edáfica	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Numero de muestras (N)	% de N total
Ligeramente degradada	0.68	0.092	-0.49	0.85	4804	13.90
Moderadamente degradada	0.61	0.1	0.16	0.83	5957	17.20
Fuertemente degradada	0.5	0.099	0.17	0.79	6675	19.30
Severamente degradada	0.43	0.093	0.16	0.76	5492	15.90
Muy severamente degradada	0.33	0.103	-0.03	0.81	11624	33.60
Total	0.47	0.163	-0.49	0.85	34552	100.00

Fuente. Elaboración propia.

La **Figura 6** muestra la distribución de los valores del NDVI que varían de -0.487232 a 0.851916, los valores cercanos a 1 representan vegetación con alta radiación fotosintéticamente activa estos valores se muestran con tonalidades verdes, y corresponden a áreas completamente cubiertas por vegetación, se encuentran asociados a comunidades arbóreas integradas por especies del género *Juniperus* y *Quercus*, entre las especies están el Sabino (*Juniperus deppeana*), Enebro (*Juniperus flaccida*), *Quercus glaucoides* (Chabarro), *Quercus opaca* (Encino) *Quercus acutifolia* née (Encino rojo) y *Quercus liebmanii* (Encino). En cambio, los valores positivos cercanos a 0, se muestran con tonalidades rojas y corresponden a áreas descubiertas de vegetación asociados a suelos erosionados que están totalmente desprotegidos de vegetación. Los valores con tonalidades amarillas representan por una parte: algunas áreas con transición ecológica entre la selva baja caducifolia y matorral xerófilo, y por otra parte: áreas fragmentadas por el cambio del uso de suelo a áreas agrícolas y están integradas por arbustos o árboles bajos, espinosos y no espinosos que se desarrolla en regiones semidesérticas, y que están integrados por comunidades arbustivas de las especies *Brahea dulcis* (Palma dulce), *Acacia farnesiana* (Espino), *Tecoma stans* (Tronadora),

Buddleja cordata (Tzonpantle), *Larrea tridentata* (Jarilla), *Ipomoea arborscen* (Cazahuate blanco), *Obucarnea* (Pata de elefante o Palma barrigona), *Bursera microphylla* (Copalillo), *Eysenhardtia polystachya* (Palo dulce), *Burcera martae* (Copal macho). Por último, los valores negativos corresponden a cuerpos de agua, como jagüeyes (**Figura 6**).

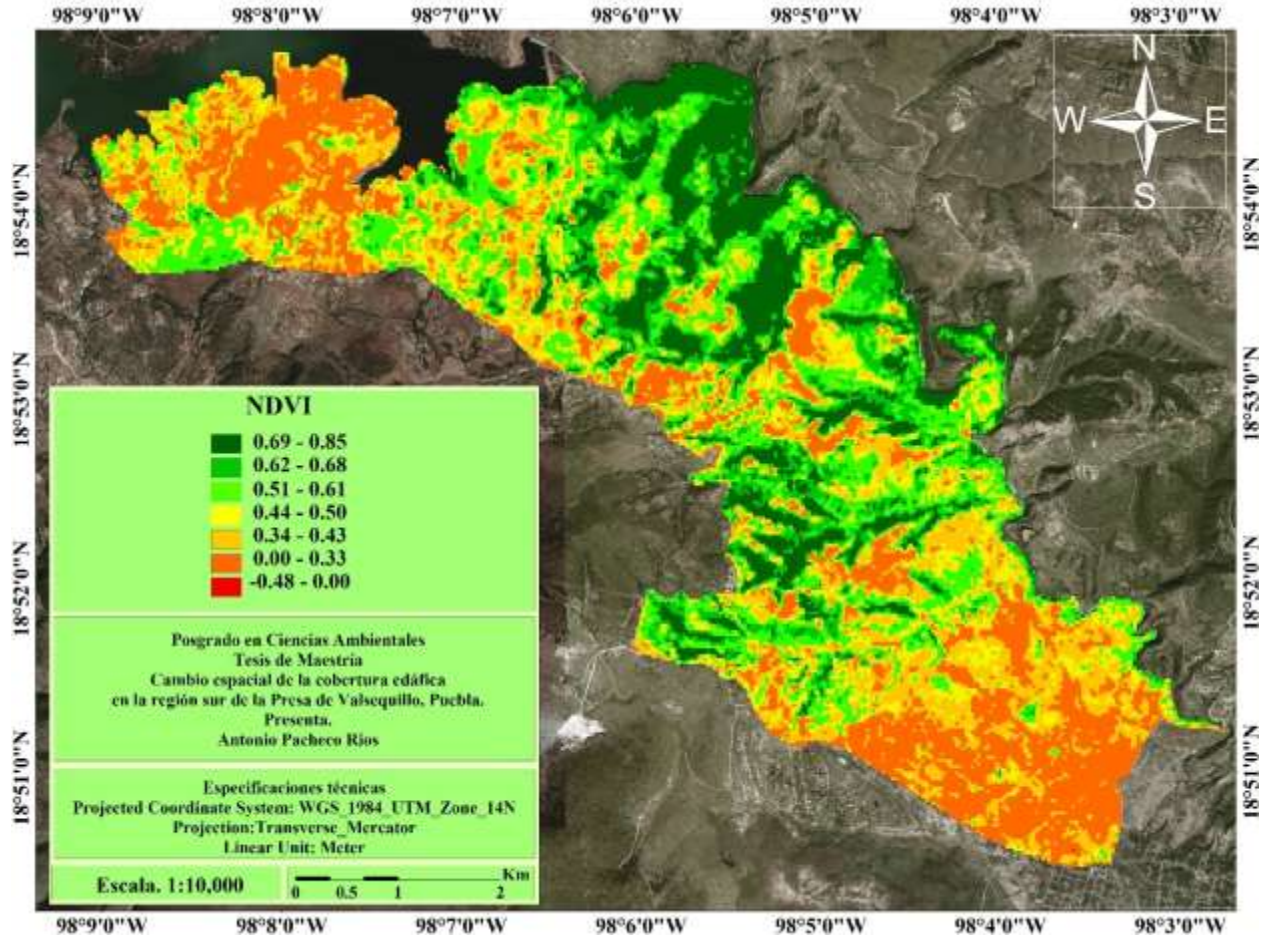


Figura 6. Distribución espacial del NDVI.

6.1.4.- Porcentaje de Cobertura Vegetal (FVC).

Se procedió a la clasificación de los valores medios del FVC, de acuerdo con la clasificación de Hochschild *et al.*, (2003), lo cual nos da una idea de la distribución, magnitud e intensidad de los procesos erosivos en cada una de las coberturas edáficas en función del FVC, con esta información se identificó la situación en la se encuentra el suelo y la vegetación en el área de estudio y los procesos degradativos dominantes. El procedimiento para el cálculo del FVC es el siguiente: Los valores de NDVI se re normalizaron para proporcionar un valor estimado del

FVC (Zeng *et al.*, 2000), teniendo en cuenta que el valor mínimo del NDVI corresponde a -0.49, y que el valor máximo corresponde a 0.85, los valores del NDVI se sustituyeron en la ecuación (Boettinger *et al.*, 2008):

$$FVC (\%) = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI_{min}}$$

La **Tabla 17** muestra los valores de FVC en cada cobertura edáfica y su estadística descriptiva lo que refleja la naturaleza variada de la vegetación dentro del área de estudio, para el caso de la cobertura edáfica ligeramente degradada, los valores del FVC varían de 0.09 a 72.58 con una media de 47.42 ± 10.60 . La cobertura edáfica moderadamente degradada varía de 2.68 a 68.82, con una media de 38.15 ± 11.67 . La cobertura edáfica fuertemente degradada muestra que el FVC varía de 3.0 a 62.44, con una media de 25.83 ± 9.72 . La cobertura edáfica severamente degradada muestra que el FVC varía de 2.55 a 57.42, con una media de 19.46 ± 8.14 . La cobertura edáfica muy severamente degradada muestra que el FVC varía de 0.10 a 66.34, con una media de 11.76 ± 7.44 .

Tabla 17. Estadística descriptiva del FVC en cada cobertura edáfica.

Cobertura edáfica	Media	Desviación estándar	Varianza	Mínimo	Máximo	Rango	Muestras (N)	% de N total
Ligeramente degradada.	47.42	10.60	112.31	0.09	72.58	72.48	4804	13.9
Moderadamente degradada.	38.15	11.67	136.19	2.68	68.82	66.14	5957	17.2
Fuertemente degradada.	25.83	9.72	94.50	3.00	62.44	59.44	6675	19.3
Severamente degradada.	19.46	8.14	66.20	2.55	57.42	54.87	5492	15.9
Muy severamente degradada.	11.76	7.44	55.30	0.10	66.34	66.24	11624	33.6
Total	25.21	15.82	250.14	0.09	72.58	72.48	34552	100

Fuente. Elaboración propia.

La **Tabla 18** muestra los resultados de clasificación de los procesos de erosión del suelo con respecto al FVC y el área para cada cobertura edáfica. La cobertura edáfica ligeramente degradada incluye áreas con vegetación forestal suficientemente densa para evitar algún grado de erosión. La

cobertura edáfica moderadamente degradada incluye áreas con cobertura vegetal herbácea, arbórea y arbustiva, donde se aprecia muy poca pérdida de suelo, en consecuencia, el suelo no está expuesto y se mantiene conservado por efecto de la vegetación. La cobertura edáfica fuertemente degradada presenta áreas con escasa cubierta vegetal como pastizales, áreas abusivas o boscosas poco densas, por los que estos suelos son de poca profundidad, aflorando en algunas partes el horizonte C, no se observa erosión en cárcavas, pero si erosión en surcos. La cobertura edáfica muy severamente degradada, se caracteriza por presentar áreas totalmente desprovistas de vegetación, con la pérdida total los horizontes del suelo y áreas donde el material parental está totalmente expuesto, además, es evidente la presencia de erosión en cárcavas profundas.

Tabla 18. Clasificación de los procesos de erosión con respecto al FVC y área para cada tipo de cobertura edáfica

Clave	Cobertura edáfica	Procesos de erosión	FVC %	Área	
				ha	%
CE_L	Ligeramente degradada.	Laminar.	47.42	735	24
CE_M	Moderadamente degradada.	Laminar y en surcos.	38.15	294	9
CE_F	Fuertemente degradada.	En surcos y cárcavas.	25.83	502	16
CE_S	Severamente degradada.	En surcos y cárcavas profundas.	19.46	800	26
CE_MS	Muy severamente degradada.	Cárcavas profundas y movimientos en masa.	11.76	776	25

Fuente. Elaboración propia modificada de Hochschild *et al.*, (2003).

Posteriormente el FVC se clasifico con respecto a los procesos de erosión porcentaje de cubierta vegetal, el cual, nos muestra la distribución espacial de diferentes niveles de erosión del suelo al sur de la presa de Valsequillo (**Figura 13**). Los resultados muestran que el área de estudio está sujeta a diferentes grados de erosión que van de ligero a muy severo, aproximadamente el 51 % (1576 ha) del área de estudio está cubierta por niveles de erosión que va de fuerte a muy severo con procesos de erosión en surcos hasta movimientos en masa. El porcentaje más bajo es de 9 % (294 ha) en áreas con grado de erosión moderado donde los procesos que predominan son la erosión en laminar y en surcos.

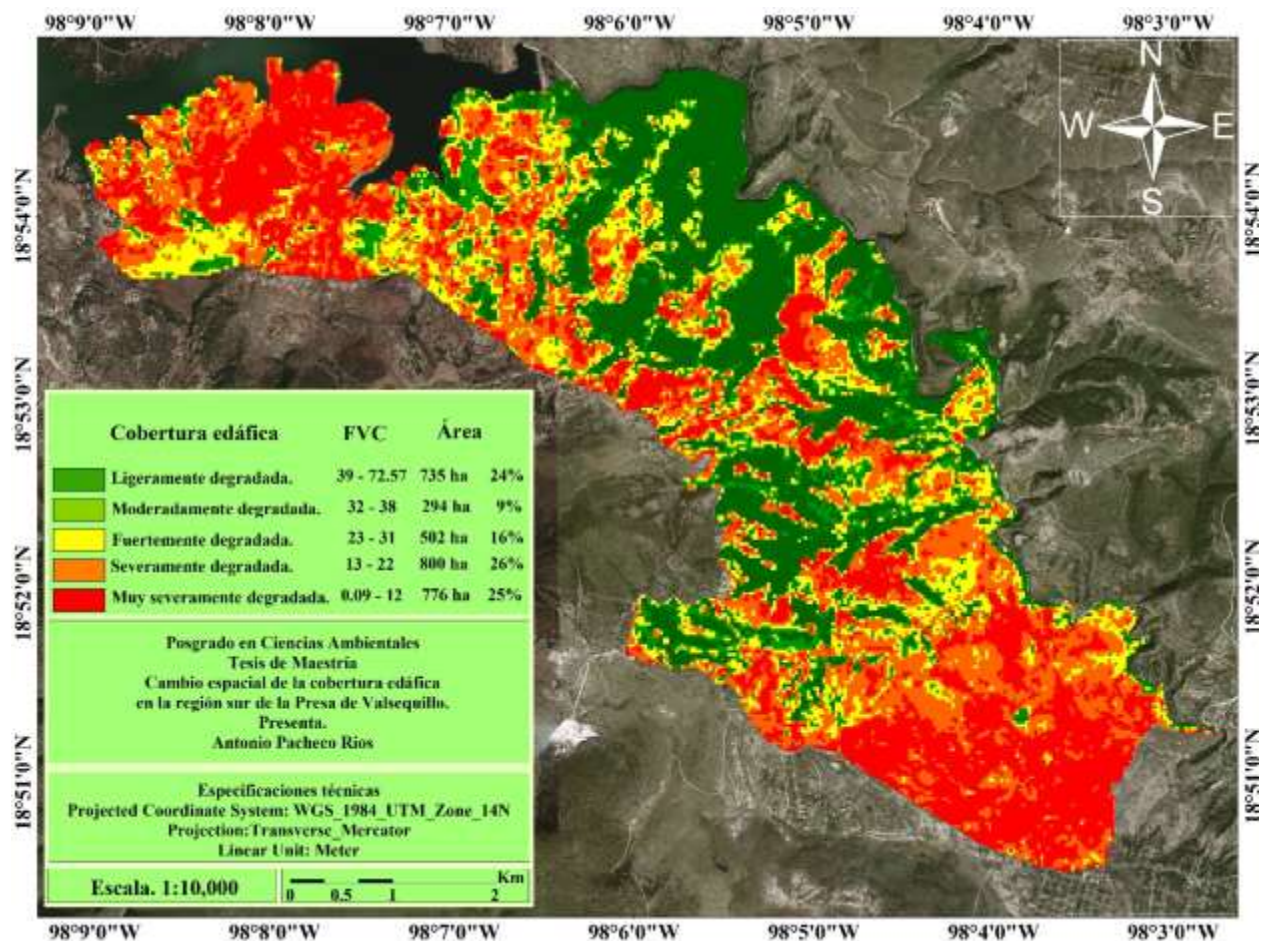


Figura 7. Distribución del porcentaje de cobertura vegetal en cada cobertura edáfica.

La cobertura edáfica ligeramente degradada presenta un rango de 39 - 72.57 % de cobertura vegetal en un área de 735 ha, es decir el 24 % del total del área de estudio. La cobertura edáfica moderadamente degradada presenta un rango de 32 a 38 % con un área de 294 ha (9 %). La cobertura edáfica fuertemente degradada presenta un rango de 23 - 31 % con 502 ha (16 %). La cobertura edáfica severamente degradada tiene un rango de 13 - 22 % con 800 ha (26 %) y la cobertura edáfica muy severamente degradada con un rango de 0.09 a 12 %, y una superficie de 776 ha (25%). En la **Tabla 19** se muestra la integración de los resultados del procesamiento, clasificación e interpretación de la imagen satelital Landsat 8 OLI con los resultados del NDVI y FVC para cada cobertura edáfica.

Tabla 19. Integración de los resultados de la fase de exploración

Cobertura edáfica					
	Ligeramente degradada	Moderadamente degradada	Fuertemente degradada	Severamente degradada	Muy severamente degradada
NDVI	0.68 - 0.62	0.61 - 0.51	0.50 - 0.44	0.43 - 0.34	0.33 - 0.0
FVC (%)	72.57 – 39	38 - 32	31 - 23	22 - 13	12 – 0.09

Fuente. Elaboración propia.

6.1.4.1.-Análisis de varianza

Posteriormente, se utilizó el análisis de varianzas (ANOVA) para contrastar la hipótesis de que las medias de las coberturas edáficas son iguales. Donde se utilizaron como variables nominales las cinco coberturas edáficas y como variables continua 34552 muestras del porcentaje de cobertura vegetal (FVC) obtenidas a partir del procesamiento de la imagen satelital Landsat 8 OLI. Para comprobar que el FVC es una muestra aleatoria independiente procedente de una población normal con varianzas iguales, se utilizó el software estadístico SPSS (IBM Corp, 2015), donde se aplicaron las siguientes pruebas estadísticas; Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad, la prueba F de Levene para comparar las varianzas y el análisis de varianzas ANOVA para comparar las medias de los valores del FVC.

Establecimiento de la hipótesis

Se planteo la hipótesis nula H_0 : todas las medias grupales son iguales, es decir, la media de las diferentes coberturas edáficas es iguales o similares. Contra la hipótesis alternativa H_A : al menos una de las medias de las coberturas edáficas sea diferentes, con un nivel de significancia de 0.05.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$$

Para verificar la normalidad de la variable dependiente se aplicó la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) a un nivel de significancia de 0.05. Se planteó la hipótesis nula H_0 : que considera que la distribución de la variable seleccionada proviene de una distribución normal. Entonces, para todo valor de probabilidad (p-valor) menor o igual al 0.05, se acepta la hipótesis H_A , y se rechaza H_0 .

Los resultados de la prueba de normalidad mostraron que las coberturas edáficas ligeramente degradada del contorno I, la cobertura edáfica moderadamente degradada del contorno II y la cobertura edáfica severamente degradada del contorno III presentan un nivel de significancia mayor a 0.05. Por lo tanto, solamente para estas coberturas edáficas aceptamos la hipótesis nula, es decir, solamente en estas coberturas edáficas la distribución de FVC se distribuyen de forma normal, con esto se cumple la segunda condición (**Tabla 18**).

Tabla 18. Test de la prueba de normalidad.

	Cobertura edáfica	Estadístico	gl	Sig.
FVC	CE_L	0.051	294	0.058
	CE_M	0.021	1035	.200*
	CE_S	0.018	2321	0.072

Fuente. Elaboración Propia.

También, existe una manera muy simple de comprobar si nuestra variable dependiente tiene o no una distribución normal, esto es realizando un histograma de frecuencias. En la **Figura 11** podemos ver que la distribución de la variable FVC para cada una de las coberturas edáficas se ajusta perfectamente a una distribución normal.

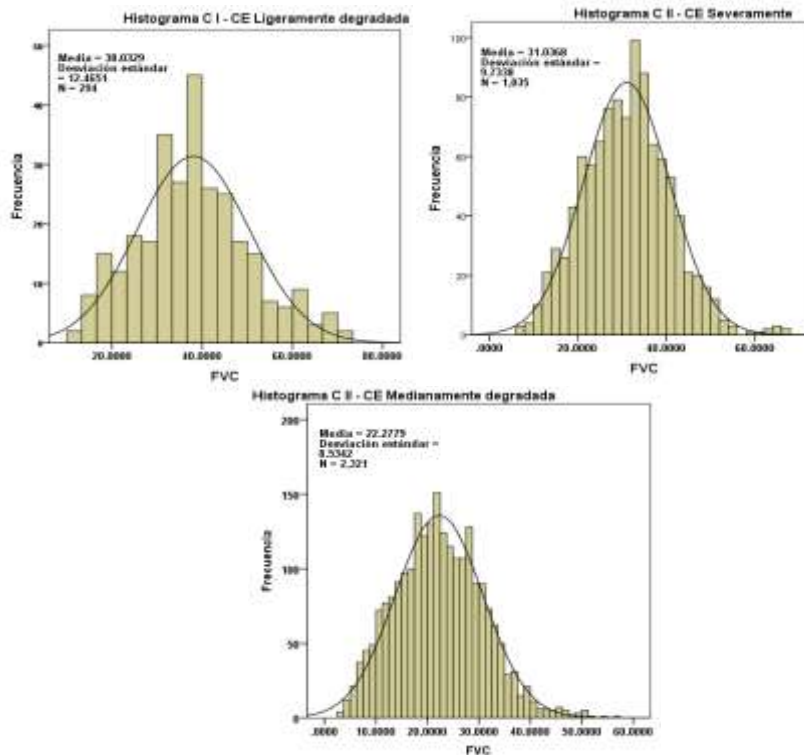


Figura 8. Frecuencias FVC, la línea negra muestra la curva de normalidad.

Para verificar la homocedasticidad de la variable dependiente se aplicó la prueba de Levene a un nivel de significancia 0.05, se planteó la hipótesis nula H_0 : las varianzas de las coberturas edáficas no son diferentes (tienen homocedasticidad), contra la alternativa H_A : las varianzas de las coberturas edáficas son diferentes (no tienen homocedasticidad). Para este caso, el nivel de significancia de la prueba Sig. (p-valor) es mayor a 0.05, las varianzas no son diferentes, por lo tanto, se rechaza la hipótesis alternativa H_A y se acepta la hipótesis nula H_0 , es decir, las varianzas de las coberturas edáficas son homogéneas, tienen homocedasticidad (**Tabla 19**).

Tabla 19. Estadístico de Levene para homogeneidad de varianzas.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
38.119	2	3647	<2.2e - 16

Fuente. Elaboración Propia.

Una vez que se cumplieron los supuestos de bondad de ajuste y homocedasticidad, se realizó el análisis de varianzas (ANOVA). Se planteó la prueba de hipótesis en donde la hipótesis nula (H_0): todas las medias grupales son iguales, contra la hipótesis alternativa (H_A): al menos una de las medias grupales es distinta. Se fijó $\alpha = 0.05$ (**Tabla 20**).

Tabla 20. ANOVA.

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	100978.59	2	50489.296	589.296	<2.2e - 16
Dentro de grupos	312465.26	3647	85.677		
Total	413443.85	3649			

Fuente. Elaboración Propia.

Con los resultados estadísticos se asumió que la media de cada cobertura edáfica es estadísticamente diferente, es decir, para la caracterización de las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla, se puede utilizar el porcentaje de la cobertura vegetal para determinar la distribución, la magnitud e intensidad de los diferentes niveles de erosión del suelo.

6.2.- Fase II. Campo.

6.2.1.- Características de los contornos.

La metodología de trabajo consistió en un recorrido por el área de estudio, a fin de conocer de forma general el grado de deterioro de los suelos y del entorno, a partir de ahí se delimitaron tres contornos, ubicados al norte, centro y sur, que son la base del estudio que se presentan en este trabajo (Figura 9).

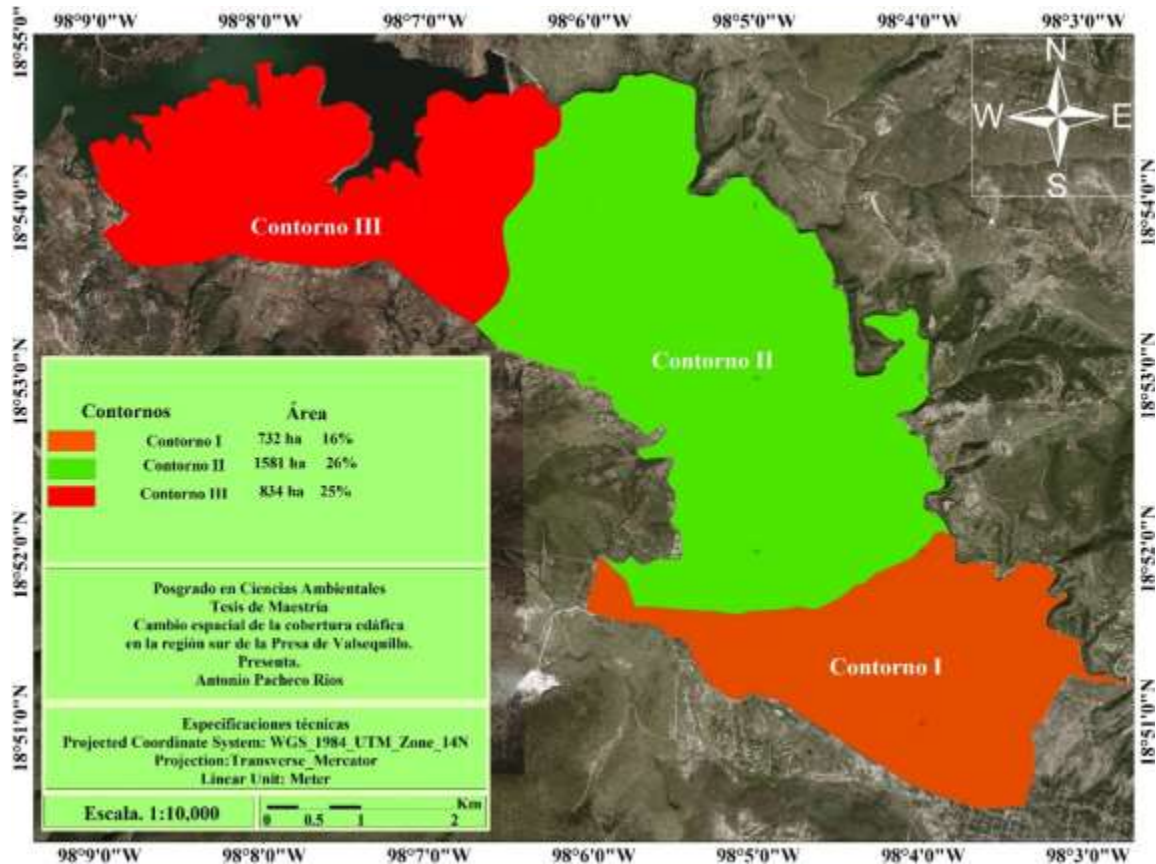


Figura 9. Mapa de contornos. Fuente elaboración propia.

Las características generales de cada contorno se describen a continuación, los cuales se tomaron en cuenta para la caracterización de las diferentes coberturas edáficas, de acuerdo con las condiciones del entorno, y las características y propiedades de los suelos en cada sitio. Esta información sirvió como base para la caracterización de las coberturas edáficas dentro de los contornos, y para hacer propuestas de uso y manejo, conservación y rehabilitación de suelo.

El primer contorno se extiende al sur del área de estudio donde se encuentra la localidad de San Miguel Acuexcomac, tiene una superficie de 732 ha, equivalente al 22.75% del área. En este

contorno, el panorama que se observa es muy desolador, las coberturas edáficas presentan niveles de degradación muy altos, observándose suelos muy deteriorados y pedregosos que no obedece a ningún desarrollo genético natural, si no a causa de la actividad humana que han favorecido la erosión acelerada (Ruiz *et al.*, 2004); en este contorno, los procesos de erosión están muy marcados, presentan coberturas edáficas con suelos de poca profundidad, poco desarrollados y con estructuras que favorecen la erosión. Las características del relieve son bastante homogéneas, la mayor parte va de ligeramente ondulado a ondulado (**Imagen 5**).



Imagen 5. Relieve ondulado características del Contorno I.

De forma aislada, se encuentran suelos con una profundidad media, los cuales han perdido todos sus horizontes más superficiales, pero aún mantienen una cobertura edáfica con afloramiento de los horizontes BC, y que actualmente son sucesiones de suelo aislados protegidos por resto de vegetación que le dan soporte, y son rodeados por áreas de suelo desnudo y afloramientos de roca. Este tipo de cobertura edáfica se encuentra al noroeste de la localidad de San Miguel Acuexcomac, sitio de observación cuatro (**Imagen 6**).



Imagen 6. Cobertura edáfica fuertemente degradada con signos severos de erosión, afloramiento del horizonte B.

Se observa un paisaje desolado que aún conserva en las partes más estables, una capa de suelo formada por un horizonte BC con un espesor entre 20 a 30 cm, y que, en algunas áreas, es aprovechado por pequeños productores para el cultivo de maíz sin protección contra la erosión (**Imagen 7**).



Imagen 7. Cobertura edáfica fuertemente degradada con cultivo de maíz.

Los materiales originales que dieron origen a estas coberturas edáficas son rocas sedimentarias calcáreas del periodo cretácico, con muy frecuentes afloramientos rocosos debido a la degradación de los suelos. Prácticamente toda la vegetación primaria ha desaparecido; sin embargo, aún subsisten importantes áreas cubiertas por vegetación secundaria, representadas por especies como: *Opuntia ficus-indica* (Nopal), *Agave salmiana var. ferox* (Agave pulquero) y *Brahea dulcis* (Palma

dulce). Además, un pasto bajo que ofrece poca protección al suelo y que en la época de sequía prácticamente desaparece (**Imagen 8**).



Imagen 8. *Yucca periculosa* (Yuca) y *Brahea dulcis* (Palma dulce).

La influencia humana en las áreas ocupada por estas coberturas edáficas es clasificada generalmente como fuerte a muy fuerte, lo que indica el grado de explotación a que han sido sometidos los suelos. El uso de suelo está asociado a pastizales que son ocupados para el pastoreo y en escasas áreas están dedicadas a la agricultura de subsistencia. Sin embargo, cada vez son más las áreas abandonadas por el estado de degradación que se observa (**Imagen 9**).



Imagen 9. Relieve ondulado del contorno I, los suelos erosionados se pueden recuperar con lentitud, si se mantiene una cobertura vegetal de pasto bajo durante varias décadas.

El contorno II, se encuentra en la parte central del área de estudio, abarca la localidad de San Bernardino Tepenene. En este contorno, las coberturas edáficas ligeramente y moderadamente

degradadas presentan suelos profundos que mantienen todos sus horizontes edáficos conservados, o bien, que presentan un horizonte superficial en formación A + B o A + C, y las coberturas edáficas que van de fuertemente a muy severamente degradadas muestran una disminución en la profundidad del suelo. En este contorno, los suelos son poco profundos, de formación *in situ*, desarrollados sobre rocas calcáreas, de estructura en bloques subangulares medianos y grandes, con un contenido en rocas y piedras en la superficie y en el interior del suelo abundante. Las condiciones naturales existentes en este contorno están determinadas en gran parte por el relieve, la vegetación, precipitación y actividades humanas, que es en última instancia, son los factores que determina la vocación de estas coberturas. El relieve donde se desarrollan estas coberturas varía de ligero a fuertemente ondulado, con un largo de ladera entre 60 y 100 m, y en ocasiones presentan laderas alargadas que varían entre 100 a 500 metros, y pendientes entre 10 y 15 %, en algunas zonas con pendientes mayores a 15 %, las cuales representan un riesgo potencial de erosión (**Imagen 10**). El drenaje interno está clasificado como drenado y por las condiciones del relieve drenaje externo se considera como muy drenado, pues durante las precipitaciones, el agua escurre con bastante facilidad por la superficie del terreno.



Imagen 10. Relieve del Contorno II.

En este contorno las coberturas edáficas son poco profundas, de formación *in situ*, los materiales parentales que sustentan estas coberturas son calcáreos con afloramientos rocosos debido a la degradación de suelo, estas rocas ser caracterizan por presentar una débil resistencia a la meteorización (Ruiz *et al.*, 2013). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad. En el contorno II, la vegetación original estaba compuesta por comunidades arbóreas integradas por especies del género *Juniperus* y *Quercus*, y que todavía con suerte se

pueden encontrar especies como el Sabino (*Juniperus deppeana*), *Juniperus flaccida* (Enebro) *Quercus glaucoides* (Chabarro), *Quercus opaca* (Encino) *Quercus acutifolia* née (Encino rojo) y *Quercus liebmanii* (Encino), los cuales ha ayudado a formar una capa de restos de vegetación en la superficie, que disipa la energía cinética de las gotas de lluvia, y del escurrimiento, disminuyendo su capacidad erosiva, y a su vez, contribuyendo al restablecimiento de las condiciones propicias para la formación del suelo, y otras especies arbustivas como se observa en la **Imagen 11** y **12**.



Imagen 11. *Agave salmiana* var. *ferox* (Agave pulquero).



Imagen 12. *Larrea tridentata* (Jarilla)

La influencia humana en estas coberturas edáficas es clasificada como fuerte a muy fuerte, debido a que los suelos han estado sometidos a una explotación agrícola intensiva durante años, sin tener en cuenta la implementación de medidas contra la erosión, lo cual ha ocasionado su degradación acelerada. En este contorno el uso de suelo está asociado a la agricultura y pastoreo como se puede ver en la **Imagen 13**, punto de observación 20. En décadas pasadas en este contorno los suelos eran profundos y fértiles; sin embargo, el cambio de uso de suelo de áreas boscosas convertidas a la agricultura y para el pastoreo, fueron la principal causa de la degradación (Ruiz *et al.*, 2013).



Imagen 13. La deforestación y el cultivo en pendiente constituyen la principal causa de la erosión, cobertura edáfica severamente degradada en el contorno II.

Por último, el contorno III, se encuentran al norte del área de estudio limitando con la presa de Valsequillo, en este contorno se localiza la localidad de San Juan Tejaluca, y tiene una superficie de 834 ha (25.92%), la profundidad de los suelos es muy variable, por un lado, predominan suelos de poca profundidad con afloramientos rocosos, que coinciden con las áreas donde se ha causado la mayor degradación al cultivar las laderas sin medidas de manejo y protección de suelos, la cobertura edáfica muy severamente degradada se extiende 253.7 ha, abarcando la mayor parte del contorno. En este contorno las coberturas edáficas están influidas por las formas del relieve, la vegetación, la erodabilidad de los suelos y las actividades humanas, lo que determina, en última instancia, el uso y manejo adecuado de estas coberturas (**Imagen 14**).



Imagen 14. Paisaje característico del contorno III.

Las condiciones del entorno donde se desarrollan estas coberturas edáficas se caracterizan por presentar un relieve ondulado, con pendientes entre 10 y 15 %, donde el largo de la pendiente se encuentra entre 60 y 100 m, lo cual constituye un factor de erosión debido a que facilita el movimiento de las aguas por la superficie del terreno sobre todo en las parcelas desnudas, las condiciones del drenaje son extremas por las características del relieve y el grado de deforestación. El material parental que sustenta estas coberturas son suelos formados a partir de rocas del cuaternario, los suelos dominantes son Cambisoles, de formación *in situ*. El clima en esta región es templado subhúmedo con lluvias en verano.

En este contorno, la profundidad de los suelos es muy variable, por un lado: predominan suelos de poca profundidad, que coinciden con las áreas donde se ha causado la mayor degradación al eliminar la vegetación y cultivar las laderas sin protección. Por el otro lado: existen suelos medianamente profundos. Estos últimos poseen propiedades agroproductivas adecuadas para la explotación agrícola, son fértiles y fáciles de manejar, se encuentra en áreas donde actualmente se desarrolla una agricultura de subsistencia. Sin embargo, en estas coberturas edáficas ha comenzado un proceso acelerado de erosión, dadas las condiciones del entorno y las propiedades de los suelos de alta erodabilidad. Bajo estas condiciones, provocara que en pocos años el suelo se degrade. En el caso de que no se apliquen medidas de manejo y conservación de suelos disminuiría aún más la profundidad del suelo, y con ello se provocará que pierda las propiedades agroproductivas que hoy sustenta, y otros procesos y funciones ecosistémicas que estos proveen. (**Imagen 15**).



Imagen 15. Erosión laminar, la capa superficial del suelo fue arrastrada, dejando al descubierto las raíces que finalmente morirán por desecación.

La vegetación original estaba compuesta por bosques de encino, todavía con suerte se pueden encontrar algunos parajes de restos de bosques secundarios pero que están perturbados, donde se puede recrear lo que fueron los bosques en esta parte de la región sur de la presa de Valsequillo. Gran parte esta vegetación ha sido sustituida por la agricultura, tala, cambio de uso de suelo. La vegetación natural ha sido remplazada por una vegetación secundaria arbustiva, esto ayudado a formase una capa de restos de vegetación en la superficie, que disipa la energía cinética de las gotas de lluvia, y del escurrimiento, disminuyendo su capacidad erosiva y a su vez contribuyendo al restablecimiento de las condiciones propicias para la formación del suelo. La vegetación está caracterizada por la presencia de *Agave salmiana var. ferox* (Agave pulquero), *Opuntia ficus-indica* (Nopal), *Brahea dulcis* (Palma dulce), *Acacia farnesiana* (Espino), *Tecoma stans* (Tronadora), *Buddleja cordata* (Tzonpantle), *Larrea tridentata* (Jarilla), *Ipomoea arborescens* (Cazahuate blanco), *Obucarnea* (Pata de elefante o palma barrigona), *Bursera microphylla* (Copalillo) punto de observación 29 (**Imagen 16**).



Imagen 16. *Yuca periculosa* (Yuca) y *Agave salmiana var. ferox* (Agave pulquero).

El contorno presenta una influencia humana muy fuerte y dadas las características del relieve con pendientes alargadas, que en muchos casos sobrepasan el 10 %, y un régimen pluvial escaso pero intenso, han provocado que la deforestación y la intensificación del suelo hayan favorecido la pérdida de una gran cantidad de suelos a través del arrastre de las partículas superficiales por las laderas alargadas que se aprecian en el contorno. El uso de suelo es de agricultura de temporal para el cultivo de maíz, calabaza y frijol (**Imagen 17**)



Imagen 17. Cultivo de maíz en el contorno III.

Si no se aplican medidas de manejo y conservación en los suelos que han sido sometidos a la explotación agrícola, se espera que en unos pocos años disminuya aún más la profundidad del suelo y aumente el porcentaje de suelos afectados pasando a un nivel de degradación mayor.

6.2.2.- Características de las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla.

6.2.2.1.- Cobertura edáfica ligeramente degradada.

La cobertura edáfica ligeramente degradada presenta algunas evidencias de pérdida de suelo en los horizontes superficiales del suelo, por escurrimiento superficial. En varias ocasiones la capa de suelo se adelgaza uniformemente y la pérdida del suelo puede llegar hasta un 25 o 50 % del horizonte A, según su espesor. Las funciones y los servicios originales de los suelos comienzan a disminuir y se encuentran poco alterados. Se requiere iniciar o mantener las prácticas de conservación, restauración y manejo de suelos.

En el sitio de descripción 9 (**Imagen 18**), localizado al noroeste de la localidad de San Juan Tejaluca, se observó una cobertura edáfica ligeramente degradada, el área ocupa suelos que presentan un horizonte A, poco profundo, rico en materia orgánica y nutrientes. Gran parte de esta cobertura está constituida por una vegetación arbustiva secundaria, y con un porcentaje alto de

cobertura vegetal mayor al 80 por ciento, promoviendo un equilibrio entre los procesos de formación y las pérdidas de suelo.



Imagen 18. Cobertura edáfica ligeramente degradada.

Los suelos de esta cobertura edáfica presentan la pérdida parcial del 25% del horizonte A. Sin embargo, el desarrollo de una vegetación secundaria paulatinamente fue deteniendo estos procesos erosivos (Ruiz, Riverol, Tamaríz y Castelán, 2005). Así, lentamente se fue formando un suelo rejuvenecido a partir de un horizonte B o C situado en la superficie previamente erosionada (Ruiz *et al.*, 2005). De esta manera, la cobertura edáfica ligeramente degradada está representadas por suelos que cuenta con un horizonte A + B poco profundo de 10 a 30 cm de espesor, o bien, suelos que han perdido prácticamente todos sus horizontes, pero el desarrollado de una vegetación secundaria arbórea o arbustiva ha disminuido los procesos degradativos, y con ello, la formación de un horizonte A + C (Ruiz *et al.*, 2004).

Prácticamente toda la vegetación primaria ha desaparecido; sin embargo, aún subsisten áreas cubiertas por vegetación arbórea y arbustiva secundaria, que están representadas por especies como *Opuntia ficus-indica* (Nopal), *Agave salmiana var. feroz* (Agave pulquero), *Brahea dulcis* (Palma dulce) y especies de la familia Poaceae que ofrece poca protección al suelo y que en la época de sequía prácticamente desaparece, se recomienda prohibir cualquier tipo de explotación agrícola o pecuaria y dejar esta cobertura edáfica para uso forestal exclusivamente, esto con el fin de evitar la erosión del suelo y la degradación del entorno, debido a la deforestación indiscriminada de los bosques y al uso y manejo inadecuado al que han sometido estos ecosistemas (Ruiz *et al.*, 2005).

6.2.2.2.- Cobertura edáfica moderadamente degradada.

La Cobertura edáfica moderadamente degradada evidencia remoción de los horizontes superficiales del suelo. Aparecen en la superficie distintos colores de suelo por la exposición de los horizontes subsuperficiales. Se aprecian manifestaciones de escurrimiento superficial, surcos, y pequeñas cárcavas. Se presenta pérdida considerable del horizonte A, e incluso en otras áreas aparece el horizonte B o C en la superficie. Las funciones y los servicios originales de los suelos se encuentran parcialmente destruidos y se requieren prácticas de conservación y restauración inmediatas; de lo contrario pueden pasar rápidamente a grado severo.

En el sitio de descripción 4, localizado al norte de la localidad de San Miguel Acuexcomac, se observó una cobertura edáfica moderadamente degradada, el área ocupa suelos poco profundos, presentan un horizonte BC con un espesor de 30 cm, y un porcentaje de rocas en la superficie del 10 por ciento, gran parte de esta cobertura está constituida por un pasto bajo, y con un porcentaje bajo de cobertura vegetal menor al 20 % (**Imagen 19**). Es importante, en este tipo de cobertura el control del pastoreo y la ganadería, ya que bajo condiciones de carga propicia la aparición de nuevos procesos de degradación del suelo como la compactación del suelo y la formación de cárcavas y desprendimientos en masa.



Imagen 19. Cobertura edáfica moderadamente degradada en el contorno I.

En este contorno las áreas dedicadas a la siembra de cultivos de maíz, frijol y chile presentan un proceso acelerado de erosión, esta situación se agravo dadas las características del entorno, posteriormente a medida que el suelo se fue perdiendo estas áreas fueron abandonadas. Bajo estas

condiciones, se desarrolló un pasto bajo que fue estabilizando y le fue proporcionado al suelo una capa protectora que impidió que este continuara erosionándose

6.2.2.3.- Cobertura edáfica fuertemente degradada.

Los horizontes superficiales del suelo están completamente removidos y los horizontes subsuperficiales expuestos; el color del suelo es más claro debido a la pérdida del horizonte A y queda expuesto el horizonte B. Se observan con frecuencia surcos y cárcavas con moderada frecuencia. La pérdida de suelo se estima en más de 75% de su espesor. Las funciones y los servicios ecosistémicos originales del suelo se encuentran ampliamente destruidos, la restauración es muy costosa y requiere mucho tiempo. Los suelos que se desarrollaron en esta cobertura edáfica, originalmente, presentaban muy buenas propiedades para la explotación, eran suelos profundos, muy fértiles, con una estructura desarrollada, que los hacía resistentes a la erosión. Sin embargo, el uso intensivo que sufrieron con la siembra de maíz, frijol y chile, y la agrotécnica, incrementan la susceptibilidad de los suelos a la erosión, y actualmente continúan en el contorno. Esta cobertura edáfica, se localiza al noroeste de San Miguel Acuexcomac, sitio de observación número uno, el área está ocupada por suelos poco profundos, que presentan un horizonte BC con un espesor entre 20 a 30 cm, y que aún en algunas áreas es aprovechado por pequeños productores para el cultivo de maíz sin protección contra la erosión (**Imagen 20**).



Imagen 20. Cobertura edáfica fuertemente degradada con cultivos de maíz.

Se observa una gran cantidad de piedras y gravas en la superficie, el tipo de influencia es muy fuerte siendo la evidencia del uso intenso que se le ha dado al suelo por parte de las actividades

humanas, sin tomar en cuenta las condiciones del entorno, acelerando los procesos de erosión del suelo.

Las coberturas edáficas del contorno II los procesos erosivos están muy marcados, presentan suelos de poca profundidad, poco desarrollados y con estructuras poco definidas, lo que resulta un suelo muy vulnerable, en este contorno, las condiciones boscosas y suelo se encontraban en equilibrio, la vegetación protegía al suelo, y el suelo se encontraba en formación, sin embargo, después de ser eliminada la capa protectora de la vegetación los procesos erosivos se manifestaran con gran intensidad (**Imagen 21**).



Imagen 21. Cobertura edáfica fuertemente degradada, en el contorno II.

En este contorno la cobertura edáfica fuertemente degradada presenta suelos relativamente jóvenes, esto según su grado de evolución y desarrollo. El material parental está representado por rocas calcáreas sobre la cual se han desarrollados los suelos, el suelo que predomina es un Leptosol cámbico de formación *in situ*, de mediana profundidad efectiva, poseen una fertilidad media, de estructura en bloques sub angulares medianos y grandes, de textura arcillosa y compacto en estado seco, sobre todo los más erosionados, y que ya han perdido el horizonte A y AB determinados por el grado de erosión del suelo, el drenaje interno es escasamente drenado y moderadamente drenado, según conserven parte de sus horizontes superiores, el contenido en piedras y piedras al interior del suelo es abundante, por lo que esto constituye un problema para el uso agrícola de estos suelos, por lo que se deben de fomentar otras actividades productivas para dar sustento a la comunidad.

Por el grado de erosión que presentan estos suelos deben considerarse rejuvenecidos, causa directa del uso intensivo al que han estado sometidos durante décadas de explotación. Los afloramientos

rocosos y el contenido de estos al interior del perfil están en dependencia del grado de erosión en cada sitio de descripción. Este tipo de cobertura se encuentra al noroeste de la localidad de San Martín los Tételes punto de observación 20 (**Imagen 22**). Esta cobertura está representada por suelos decapitados que han perdidos los horizontes más superficiales, pero aun presentan una capa de suelos de poca profundidad.



Imagen 22. Cobertura edáfica fuertemente degradada.

En décadas pasadas los suelos eran profundos y fértiles; sin embargo, el cambio de uso de suelo de áreas boscosas convertidas a la agricultura y para el pastoreo, fueron la principal causa del incremento de suelos de bajo potencial agro productivo. Los habitantes de las comunidades que están asentadas en el área pueden encontrar en este tipo de coberturas el sustento para sus familias en las tareas de siembra, prestando atención y el cuidado a estas áreas ayudando así que cada árbol plantado se desarrolle logra alcanzar un tamaño adecuado lo antes posible.

6.2.2.4.- Cobertura edáfica severamente degradada.

En la cobertura edáfica severamente degradada, se evidencia pérdida total de los horizontes superficiales y pérdida parcial de los horizontes subsuperficiales del suelo, se presenta cubrimiento continuo de una red de surcos y cárcavas medianamente profundas, y las funciones y los servicios originales de los suelos como la fertilidad, la regulación y almacenamiento de agua, la biodiversidad, entre otros, están completamente destruidos y la vegetación es escasa o nula, su restauración es muy difícil, muy costosa y requiere mucho tiempo.

Esta cobertura edáfica, se localiza al norte de la localidad de San Miguel Acuexcomac, sitio de descripción 17, el área está ocupada por suelos de poca profundidad, presentan un horizonte CD con un espesor de 30 cm, y que en algunas áreas es aprovechado por pequeños productores para el cultivo. En esta cobertura edáfica gran parte está constituida por pastizales y con un porcentaje bajo de cobertura vegetal menor al 20 % (**Imagen 23**).



Imagen 23. Paisaje característico de una cobertura edáfica severamente degradada.

La influencia humana en las áreas ocupada por estas coberturas edáficas es clasificada generalmente como fuerte o muy fuerte, lo que indica el grado de explotación a que han sido sometidos los suelos. La puesta en explotación de parcelas en situadas en pendientes debió obligar primero a tomar una serie medidas para evitar el arrastre del suelo por las aguas de escorrentía. Los grados de erosión varían de acuerdo con el nivel de explotación al que han sido sometido los suelos, así existen zonas donde le grado de erosión es moderado, pero en otro llega a ser muy fuerte como en la **Imagen 24** donde se muestra la formación de cárcavas fundamentalmente en zonas donde se implantaron cultivos agrícolas limpios.



Imagen 24. Erosión en cárcavas, la devastación que se ilustra es consecuencia de la eliminación de la vegetación y el efecto de las aguas de escurrimiento.

La cobertura edáfica severamente degradada en el Contorno III presenta signos de erosión de suelo, se caracterizan por presentar suelos poco profundos, los cuales han sido sometidos a la explotación agrícola por lo que es de esperarse que en unos pocos años más disminuya la profundidad del suelo, si no se aplican medidas de manejo y conservación. Las características del relieve son bastante homogéneas, la mayor parte del relieve va de ligeramente ondulado a ondulado. De forma aislada, se encuentran suelos con una profundidad mediana, fértiles, bien estructurados, medianamente compactos, medianamente plásticos y adhesivos, propiedades que aumentan la resistencia a la erosión sin afectar las características agroproductivas de los suelos, los cuales han perdido el horizonte A y parte del B (**Imagen 25**).



Imagen 25. Cobertura edáfica severamente degradada.

6.2.2.5.- Cobertura edáfica muy severamente degradada.

La cobertura edáfica muy severamente degradada evidencia pérdida completa de todos los horizontes superficiales y subsuperficiales del suelo; el color del suelo es claro debido a la pérdida del horizonte A y B, quedado en la superficie el material parental, se aprecian manifestaciones de escurrimiento superficial, surcos y laminar, además se presentan procesos de erosión intensos como formación de cárcavas profundas.

Este tipo de cobertura edáfica se encuentra en los alrededores de la localidad de San Miguel Acuexcomac, punto de observación 3. El relieve es ondulado, con el largo de la ladera entre 60 y 100 m, e inclinación de las pendientes entre los 10 y 15 %. El drenaje se considera como muy drenado. Los niveles de degradación en esta cobertura edáfica son muy altos, esto se debe a los factores naturales como la inclinación de la pendiente y el bajo porcentaje de la cubierta vegetal (menor al 20 %), y por el otro, el tipo de influencia humana muy fuerte, lo cual ha condicionado la predominación de este tipo de coberturas edáficas poco profundas en el contorno I. En esta cobertura edáfica el impacto de las actividades humanas sobre los suelos ha sido muy fuerte, ya que la mayoría han perdido todos sus horizontes superiores (**Imagen 26**).



Imagen 26. Cobertura edáfica muy severamente degradada en el contorno I.

Los procesos de erosión dominantes han sido laminar y en cárcavas, en esta cobertura edáfica se han perdido todos los horizontes del suelo con el consecuente afloramiento de rocas, piedras y gravas en superficie mayores al 80% y con un porcentaje bajo de la cubierta vegetal, menos del 10 % de la superficie. En este contorno se ha desarrollado un proceso de erosión muy intenso, erosión laminar y en surcos que parecen en la primera etapa, esta forma de erosión puede pasar inadvertida

durante muchos años, excepto para un experto, la cual arrastra la cobertura edáfica con cierta facilidad creando las condiciones para la erosión laminar y posteriormente la formación de cárcavas.

La cobertura edáfica muy severamente degradada en el contorno II se encuentra en los alrededores de la localidad de San Juan Tejaluca, punto de observación 10 (**Imagen 27**). El relieve es ondulado, con el largo de ladera entre 60 y 100 m con pendientes entre los 10 y 15 %. El drenaje externo es excesivo y el interno muy bueno, existen afloramientos rocosos y gran cantidad de gravas y piedras en la superficie entre 60 y 80 %. Los niveles de degradación en esta cobertura edáfica son muy altos, presenta suelos poco profundos que mantienen un horizonte C, y además se caracteriza por presentar afloramientos rocosos y un porcentaje alto en rocas, piedras y gravas entre 60 y 80 % en la superficie. La influencia humana en las áreas ocupada por estas coberturas edáficas es clasificada como muy fuerte, debido a que se ha practicado un uso inadecuado de las tecnologías de explotación que favorecen la erosión.



Imagen 27. Cobertura edáfica muy severamente degradada en el Contorno II.

Esta cobertura edáfica presentar suelos poco profundos, de formación *in situ*, desarrollado sobre rocas calcáreas, con la presencia de rocas y piedras en la superficie que varía entre un 60 a 80 %. El drenaje interno es considerado como medianamente drenado y el externo excesivamente drenado, lo cual favorece arrastre de las partículas sólidas superiores. En las coberturas edáficas más afectadas por la erosión afloran rocas, piedras y gravas en la superficie, lo cual es un indicador del grado de erosión del suelo, y con ello la dificultad a la hora de aplicar labores agrícolas (**Imagen 28**).



Imagen 28. Cobertura edáfica severamente degradada en el contorno II.

La degradación de los suelos principalmente se debe a la explotación inadecuada de las tierras, la tala de árboles, cultivo de maíz en pendientes susceptibles a la erosión, el pastoreo intensivo de ganado caprino y vacuno y la falta de adopción de medidas de conservación de suelos. El uso del suelo es agrícola y pastoreo intensivo en algunas parcelas se observa afloramiento de rocas, los cuales aparecen como testigos de la explotación que ha sufrido el suelo. Los procesos de erosión en este contorno son: laminar producida por las aguas de lluvia que escurre por la superficie del suelo desnudo o mal protegidos por el cultivo de maíz, frijol y chile en pendientes pronunciadas, y en algunas otras áreas dentro del contorno se observan cárcavas por efecto de la concentración de aguas en las cañadas desprovistas de vegetación como se muestra en la (**Imagen 29**), lo que constituye una alerta sobre el peligro de erosión que se está presentando en el entorno.



Imagen 29. Vegetación crece dentro de la cárcava.

La **Imagen 30** muestra un “Islote de suelos” rodeado de una cobertura edáfica muy severamente degradada, por lo que, si no se llevan prácticas de manejo y conservación de suelo, estas áreas que aún mantienen una cobertura edáfica fuertemente degradada en un futuro cercano se podrían perder.



Imagen 30. Cobertura edáfica dispuesta en islotes.

La cobertura edáfica muy severamente degradada en el contorno III se encuentra al norte de la localidad de San Juan Tejaluca punto de observación 32 (**Imagen 31**), presentan suelos con un horizonte CD y con una profundidad de entre 20 a 30 cm, presentan afloramientos rocosos y un porcentaje alto en rocas, piedras y gravas en la superficie mayor al 80 %. El drenaje externo es considerado como excesivo. La vegetación es muy escasa, solo algunos espinos (*Acacia farnesiana*) y nopales (*Opuntia ficus*) aislados y especies de la familia Poaceae que ofrecen poca protección al suelo, las cuales prácticamente desaparece en la época de sequía.



Imagen 31. Vegetación aislada de espinos (*Acacia farnesiana*) y nopales (*Opuntia ficus*)

Esta cobertura presenta influencia humana muy fuerte debido al uso intensivo del suelo por parte de los pobladores ya que utilizan estas tierras para la siembra de cultivos agrícolas (Maíz, frijol, chile), sin tomar en cuentas las condiciones del entorno y la implementación de medidas para protegerlo de los procesos erosivos como la fuerza de impacto de lluvia y el agua de escurrimiento superficial. El relieve es ondulado, con pendientes entre los 10 y 15 %. El tipo de erosión es laminar, la cual es responsable de la pérdida de la parte superior del suelo, es decir, que una buena parte de los suelos ya se ha perdido los horizontes A, B y parte del C, situación alarmante si se tiene en cuenta que en los horizontes más superficiales es donde se cultivaban las plantas con mayor productividad (**Imagen 32**).



Imagen 32. Cobertura edáfica muy severamente en el contorno III.

La influencia humana sobre todo en la parte norte del contorno III es muy fuerte, los recursos naturales se han manejado sin una estrategia de explotación adecuada que promueva el mantenimiento de las condiciones originales de este ecosistema. En este contorno en general, la forma de explotación de los recursos naturales ha sido irracional desde todos los puntos de vista, y es la principal causa de los niveles de degradación del suelo, erosión y deforestación.

La clasificación de las coberturas edáficas se realizó de acuerdo con los indicadores y factores ambientales que controlan la erosión del suelo de manera que pueda ser utilizados para la caracterización y evaluación de los procesos y niveles de erosión en las distintas coberturas edáficas con el fin de determinar la distribución espacial de la magnitud e intensidad de los procesos erosivos y niveles de erosión en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla. De esta manera en la **Tabla 21** se muestran la integración de los resultados en la Fase II de campo.

Tabla 21. Integración de los resultados de la Fase II de trabajo de campo.

Cobertura edáfica	Ligeramente degradada	Moderadamente degradada	Fuertemente degradada	Severamente degradada	Muy severamente degradada
“Grado de erosión”	Ligera.	Moderado.	Fuerte.	Severo.	Muy severa.
Proceso de erosión	Laminar.	Laminar y en surcos.	En surcos.	En surcos y cárcavas.	Cárcavas profundas.
Vegetación y uso de suelo.	Vegetación secundaria de bosque encino.	Vegetación secundaria arbustiva.	Pastizales y cultivos.	Pastizales.	Comunidades herbáceas.
Rocas, piedras o gravas (%).	>20	20 - 40	40 - 60	60 - 75	>75
Drenaje externo.	Escasamente.	Drenado.	Drenado.	Muy drenado.	Excesivamente
Cubierta vegetal (%).	<75	75-60	60-40	40-20	>20
Influencia humana.	Nula.	Nula a Moderada.	Moderada a fuerte	Fuerte a muy fuerte.	Muy Fuerte.

Fuente. Elaboración propia.

6.3.- Fase III. Integración.

6.3.1.- Clasificación y distribución de las coberturas edáficas.

De acuerdo con el Manual para la descripción de perfiles de suelo y evaluación del entono (Ruiz et al., 1999), se clasificaron las cinco coberturas edáficas en relación con la pérdida de los horizontes (**Tabla 22**).

Tabla 22. Perdida de los horizontes del suelo en cada una de las diferentes coberturas edáficas.

Cobertura edáfica	Pérdida de los horizontes del suelo
Ligeramente degradada	Pérdida parcial del horizonte A hasta un 25 %, por erosión hídrica.
Moderadamente degradada	Pérdida del horizonte A hasta un 75 % incluso afloramiento del horizonte B, se aprecia manifestaciones de erosión laminar y en surcos.
Fuertemente degradada	Pérdida completa del horizonte A y afloramiento del horizonte B, se observa erosión laminar y en surcos profundos.
Severamente degradada	Pérdida completa del horizonte A y hasta el 75 % del Horizonte B incluso afloramiento del horizonte C, se observa erosión laminar, en surcos y cárcavas.
Muy severamente degradada	Pérdida de todos los horizontes A, B y C, presenta una red de surcos y cárcavas muy profundas.

Fuente. Elaboración propia.

La cobertura edáfica ligeramente degradada, presenta pérdida parcial del horizonte A hasta un 25 %, se aprecian manifestaciones de erosión laminar. La cobertura edáfica moderadamente degradada, presenta evidencia de pérdida del horizonte A hasta un 75 % e incluso afloramiento del horizonte B en algunas áreas, se aprecia manifestaciones de erosión laminar y en surcos. La cobertura edáfica fuertemente degradada, presenta pérdida completa del horizonte A y pérdida del 25 % del horizonte B. La cobertura edáfica severamente degradada presenta la Pérdida completa del horizonte A hasta el 75 % del horizonte B e incluso afloramiento del horizonte C, se observa erosión laminar, en surcos y cárcavas. La cobertura edáfica muy severamente degradada presenta la pérdida de todos los horizontes subsuperficiales A, B y C, con áreas donde el material parental está totalmente expuesto, es evidente la presencia de erosión de cárcavas de un metro o más de ancho, estas áreas están totalmente desprovista de vegetación, excepto en áreas remanentes, que son las únicas partes donde se observa el suelo.

Se elaboró el mapa de cobertura edáfica que muestra la distribución de las coberturas edáficas con base a la integración de los resultados de la Fase I exploración y Fase II trabajo de campo (**Figura 11**).

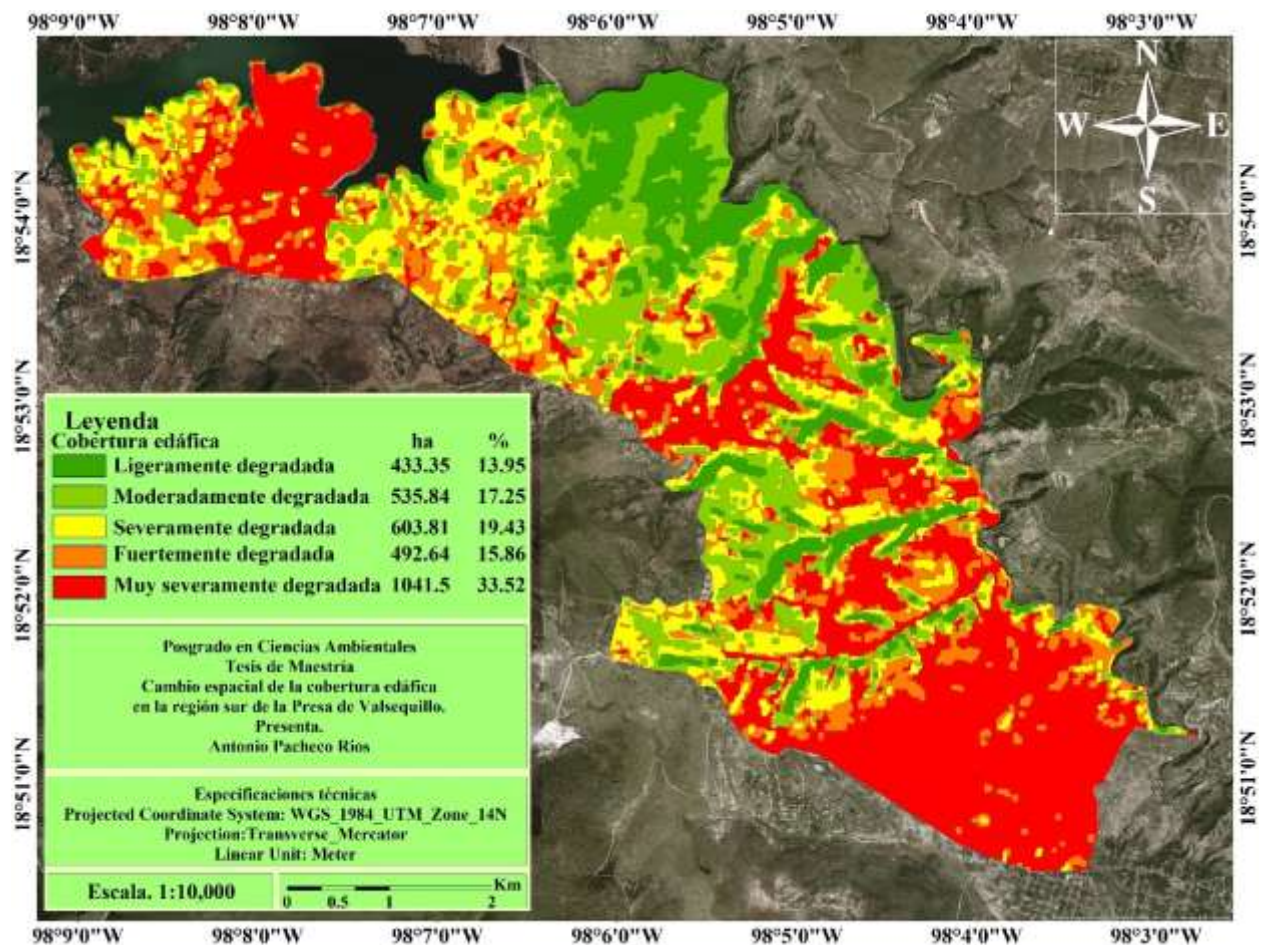


Figura 10. Distribución de las coberturas edáficas. Fuente. Elaboración propia.

6.3.2.- Propuesta de manejo y conservación de las coberturas edáficas.

Las coberturas edáficas se clasificaron de acuerdo con las propiedades edáficas y las condiciones del entorno que condicionan la erosión del suelo, con el objetivo de proteger y recuperar las zonas en donde los niveles de erosión son de fuerte a muy severos se proponen medidas de manejo y conservación de las coberturas edáficas. La distribución espacial de las coberturas edáficas dentro de los contornos muestra los efectos de la erosión acelerada provocada, por un lado, por las malas prácticas de manejo y uso de suelo, la eliminación de la cobertura vegetal, aumento de la frontera agrícola y el pastoreo intensivo y, por otro lado, las condiciones del entorno como el relieve, material parental, cobertura vegetal, intensidad en las lluvias que condicionan la erosión del suelo.

A continuación, se describe una serie de propuestas estratégicas con respecto a las medidas de conservación y manejo del suelo en la región sur de la presa de Valsequillo que pueden ser la base para un manejo sostenible del suelo, mismas que están basadas en los resultados de la presente tesis y en donde, se parte del enfoque sistémico que permite describir los factores más importantes que están relacionados con los cambios en la cobertura edáfica.

6.3.4.1.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica ligeramente degradada.

La cobertura edáfica ligeramente degradada se caracteriza por presentar un relieve llano a casi ligeramente ondulado con una pendiente máxima de 3%, el drenaje es bueno y la distribución del agua en el interior es homogénea o casi homogénea, cuando la pendiente es extrema 3 %, se recomienda como tecnología de explotación agrícola la creación de terrazas planas o nivelación a fin de que todas las plantas cultivadas se desarrollen bajo el mismo régimen de humedad.

Una característica importante de la cobertura edáfica ligeramente degradada es la posibilidad de emplear máquinas agrícolas en la preparación del suelo para la siembra y labores culturales como siembra, fertilización y recolección.

Dadas las características naturales existentes de pendientes ligeras, se proponen las siguientes medidas.

- Surcado en contorno.
- Construcción de bordos protegidos.
- Implantaciones de barreras vivas con *Vetiveria zizanioides*.
- Rotación de cultivos.
- Cultivos de abonos verdes
- Cultivos intercalados

Se recomienda prohibir todo tipo de actividad agrícola en los contornos donde existan condiciones forestales, a cambio favorecer las condiciones de conservación del suelo y vegetación, y en los contornos más degradados, se recomienda la repoblación forestal con la siembra de especies del género *Juniperus* y *Quercus* como el Sabino (*Juniperus deppeana*), *Juniperus flaccida* (Enebro) *Quercus glaucoides* (Chabarro), *Quercus opaca* (Encino) *Quercus acutifolia* née (Encino rojo) y *Quercus liebmanii* (Encino), *Pinus cebroides* (Pino) y *Leucaena leucocephala* (Guaje) con la

finalidad de crear primero condiciones de bosque, fundamentalmente con las mismas especies que formaron los bosques primarios. La prohibición de la tala de árboles debe constituir un principio inviolable y resguardarlo por las autoridades del municipio. En este sentido se recomienda se debe crear un grupo de especialistas que elaboren una estrategia de explotación forestal y controlen esta actividad a través de un cuerpo de vigilancia capacitado para hacer cumplir las normas ambientales que deben regir esas zonas.

6.3.4.2.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica moderadamente degradada.

La cobertura edáfica moderadamente degradada presenta un relieve ondulado que puede ir desde ligeramente hasta fuertemente ondulado, donde el largo de la pendiente generalmente se encuentra entre 60 – 100 m y las pendientes pueden ser menor del 10 % y cuando es fuertemente ondulado el relieve puede alcanzar hasta los 25 %. Esta cobertura edáfica se caracteriza por presentar buen drenaje. La dificultad que presenta es el peligro de la erosión que pueda ocasionar el manejo inadecuado de los suelos: por lo que si se dedican a la explotación agrícola o pecuaria se tiene que tomar medidas para la conservación de los suelos.

En estas áreas se recomienda: la siembra de *Vetiveria zizanioides*, para mantener la estabilidad del suelo y evitar la acción de los agentes atmosféricos afecte la cobertura del suelo. Además, se propone realizar en esta cobertura edáfica el trazo de surcos para la siembra siguiendo las curvas de nivel al sembrar y cultivar sobre esta curva cada hilera de la planta forma un obstáculo al arrastre del suelo por el agua de escorrentía, sin embargo, cuando la pendiente sea superior a cinco por ciento no es suficiente para evitar el arrastre del suelo por las aguas de escorrentía; por ellos es recomendable combinarla con otras barreras vivas y muros para que el sistema sea más eficiente. Barreras vivas como el *Vetiveria zizanioides* que es un zacate muy vigoroso y de fácil establecimiento en áreas con pendientes; es muy utilizado en el Caribe y Asia para el control de la erosión, dadas sus características de ser una planta con un sistema radicular difuso que puede penetrar hasta más de 60 cm de profundidad, además de ser resistente a temperaturas extremas, a sequias, inundaciones y no ser una planta invasora.

Hay que disminuir la actividad agrícola en laderas inclinadas y sin protección del suelo y aplicar que en cada parcela que se cultive con medidas de conservación, como:

- Surcar en contorno

- Construir bordos protegidos
- Trazar acequias de laderas
- Implantar barreras vivas
- Construcción muros contención
- Crear terrazas individuales
- Realizar el control de cárcavas en áreas afectadas
- Aplicar abonos orgánicos

Adicionalmente, se debe implementar otras prácticas de manejo de coberturas como:

- Cultivar abonos verdes entre hileras
- Realizar cultivos asociados
- Cultivar franjas
- Realizar cultivos alternos

6.3.4.3.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica fuertemente degradada.

Cobertura edáfica fuertemente degradada presenta un relieve ondulado que puede ir desde ligeramente ondulado hasta fuertemente ondulado, donde el largo de la pendiente generalmente se encuentra entre 60 a 100 metros y las pendientes oscilan entre 10 – 20 %, ocasionalmente cuando el relieve es ondulado puede ser menor de 10 %. En esta cobertura edáfica se recomienda:

- Implantación de barreras vivas
- Realizar el control de cárcavas en áreas afectadas
- Cultivo de cobertura

En esta cobertura edáfica los suelos han estado sometidos a una explotación agrícola intensa durante muchos años, sin tener en cuenta la implementación de medidas contra la erosión, lo que ha ocasionado su degradación acelerada, se recomienda, de manera imperativa, tomar medidas de conservación en las áreas menos accidentadas, si se somete a cultivos agrícolas o plantaciones frutales, por otra parte, evitar a toda costa evitar darle otro uso que no sea forestal a las zonas con vegetación secundaria arbórea y arbustiva sobre todo en áreas alomadas, por ser de alto riesgo de erosión.

6.3.4.4.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica severamente degradada.

La Cobertura edáfica severamente degradada presenta un relieve que va de ligero a fuertemente ondulado, donde el largo de la pendiente en promedio de 60 a 100 metros y las pendientes oscilan entre 10-20 %.

En algunas áreas el uso intensivo de los suelos debido a la agricultura de temporal implicó que, gran parte del año el suelo quedara desprovisto de cobertura vegetal alguna que lo protegiera de la lluvia y de la escorrentía del agua. Por esta razón, las propiedades agroproductivas de estos suelos son casi nulas debido a las condiciones donde se desarrollaron como: el grado de inclinación de la pendiente, la susceptibilidad de la erosión, y en algunas áreas la poca profundidad del suelo que ya no es adecuada para la explotación agrícola. La **Imagen 33**, muestra las áreas donde se recomienda establecer estas medidas de control de la erosión del suelo.



Imagen 33. Movimiento en masa, se propone la siembra en contorno de *Vetiveria zizanioides*.

La siembra en contorno se realiza al trazar los surcos siguiendo las curvas de nivel y constituye la base para el establecimiento y la base para el desarrollo de cualquier medida; al sembrar y cultivar sobre esta curva cada hilera de *Vetiveria zizanioides*. Estas barreras vivas se utilizan con el fin de reducir la velocidad del agua que escurre sobre la superficie del terreno y retener el suelo que arrastra a su paso: como estas barreras se establecen siguiendo las curvas de nivel, constituyen una guía permanente para la siembra en contorno. Estas plantas también son un material apropiado para ser utilizados como arropo del suelo, evitando así el golpe directo de las aguas de lluvia y arrastre del suelo.

6.3.4.5.- Propuesta de manejo y conservación cobertura edáfica muy severamente degradada.

Cobertura edáfica muy severamente degradada presenta un relieve ondulado, donde el largo de la pendiente es en promedio 100 a 500 metros y las pendientes oscilan entre 10 – 15 %, ocasionalmente cuando el relieve es alomado la pendiente puede ser superior al 15 %. En las coberturas edáficas muy severamente degradadas se recomiendan realizar el control de cárcavas en áreas afectadas con la implantación de barreras vivas como la siembra de agave para frenar la erosión del suelo (**Imagen 34**) y también medidas estructurales para la conservación de suelo y agua.



Imagen 34. Agave ayuda a controlar la erosión en cárcavas, cobertura edáfica muy severamente degradada, contorno I.

6.4.- Análisis estadísticos

Con el fin de probar estadísticamente si los contornos y las coberturas edáficas son variables asociadas o independientes, se realizó la prueba estadística de independencia Chi cuadrado con el software SPSS (IBM Corp, 2015). La prueba Chi-Cuadrado se usa para determinar si existe una relación significativa entre dos variables nominales (categóricas). La frecuencia de cada categoría para una variable nominal se compara entre las categorías de la segunda variable nominal. Los datos se pueden mostrar en una tabla de contingencia donde cada fila representa una categoría para una variable y cada columna representa una categoría para la otra variable (**Tabla 23**).

Tabla 23. Tabulación cruzada para el contorno y cobertura edáfica.

	Cobertura edáfica					Total
	CE_L	CE_M	CE_F	CE_S	CE_MS	
Contorno I	294	475	828	1105	5454	8156
Contorno II	4164	4447	3298	2321	3336	17566
Contorno III	346	1035	2549	2066	2834	8830
Total	4804	5957	6675	5492	11624	34552

Fuente. Elaboración propia.

Se planteó la hipótesis nula (H_0); no hay relación entre los contornos y las coberturas edáficas, contra la hipótesis alternativa (H_A); existe relación entre los contornos y las coberturas edáficas. Se fijó el nivel de significación $\alpha = 0.05$. En la **Tabla 24** se muestra el valor del estadístico de prueba Chi cuadrado de Pearson es 8904.672 con 8 grados de libertad (df) y el valor del nivel de significancia de la prueba Sig. (p-valor) menor a 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0), y se acepta H_A , es decir, existe relación de dependencia entre los contornos y las coberturas edáficas.

Tabla 24. Prueba de chi cuadrada.

	Valor estadístico	Grados de libertad 8 (df)	Sig.
Chi cuadrada de Pearson	8905	8	<2.2e - 16
Muestras (N)	34552		

Fuente. Elaboración propia.

Con los resultados estadísticos se asumió que entre los contornos y las coberturas edáficas existe relación de dependencia, es decir, existe relación entre los indicadores de erosión y los factores ambientales que condicionan la erosión del suelo.

CAPITULO VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

La información espacial confiable y precisa sobre áreas erosionadas es fundamental para comprender los problemas de degradación del suelo y para la provisión de programas apropiados de remediación y control. Debido al rápido incremento en los niveles de erosión del suelo a nivel mundial que amenaza actualmente la productiva tierra, surge la necesidad de métodos precisos, efectivos y de gran alcance para el monitoreo y la estimación de la erosión del suelo.

Para estimar la degradación de los suelos se han utilizado ampliamente metodologías cuantitativas y cualitativas que han permitido identificar la distribución, magnitud e intensidad de las pérdidas de suelo, sobre las cuales se han implementado medidas de conservación, protección, restauración del suelo. Por ejemplo, las metodologías cuantitativas se basan en la estimación de la pérdida del suelo, mediante el uso de modelos de predicción, que incluyen mediciones de campo y la integración de información espacial de los factores que condicionan la erosión del suelo como: el relieve, la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la vegetación y uso de suelo (Wischmeier y Smith, 1978). Sin embargo, aunque estas metodologías permiten la estimación de los valores absolutos de pérdida de erosión del suelo, están restringidos a pequeñas áreas, y suelen ser laboriosos, lentos y costosos, y que en la mayoría de los casos, solo se han utilizado para evaluar el papel de ciertos factores de erosión, desarrollo de modelos y propósitos de validación más que para la evaluación espacial de la erosión del suelo (Montgomery, 2007), por lo que no ofrecen información adecuada para el monitoreo de la erosión a escala regional (Le Roux et al. (2007). Por el contrario, las metodologías cualitativas se basan en la categorización de la cantidad de pérdida de suelo, mediante trabajo de campo que involucran la identificación y evaluación de los niveles de erosión del suelo (Krasinlikov *et al.*, 2011). Sin embargo, estos métodos permiten el mapeo a pequeña escala de las características de la erosión, y suele pasar que, para mapear áreas más grandes, su implementación conlleve muchos recursos económicos, personal y tiempo, y que algunas veces, resulte inaplicable, debido a la escasa accesibilidad a los sitios erosionados, por lo que esto a menudo conduce a una subestimación de la erosión real del suelo, esto se convierte en un desafío en la mayoría de los casos porque actualmente se requiere información actualizada sobre la erosión del suelo a nivel local, para la implementación de acciones para la conservación y protección del suelo y para el manejo sustentable de tierras y el trabajo con comunidades.

Por esta razón, el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales ha aumentado en gran medida la capacidad de cuantificar y monitorear la erosión del suelo a escala local, nacional y regional (Le Roux *et al.*, 2007). Esto se debe a que las técnicas tradicionales de mapeo de la erosión implicaban la detección manual de áreas erosionadas a través de la interpretación visual del color del suelo y sus cambios relacionados con la erosión, y el principal desafío con estos enfoques es que se limitaban al conocimiento experto, además de ser lentos y costosos (Dube *et al.*, 2017). Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, las técnicas de detección remota satelital para evaluar y monitorear los niveles de erosión del suelo están proporcionando información cuantitativa con menos esfuerzo y una disminución en tiempo y costos. Los resultados de esta investigación demostraron que la detección remota satelital ofrece medios gratuitos, de fácil acceso, de amplio alcance y oportunos para adquirir información sobre la magnitud y distribución espacial de los procesos erosivos, además de que el mapeo de la erosión fue con alta confiabilidad.

La información obtenida por detección remota satelital permitió detectar la erosión del suelo en función de los valores de reflectancia espectral como en los trabajos de investigación de Le Roux *et al.*, (2007) y Vrieling, (2006). Los diferentes valores de reflectancia son causados por los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de la capa superior del suelo debido a los procesos relacionados con la eliminación, transporte y acumulación del suelo. Por lo tanto, la posibilidad y precisión en la delimitación de suelos erosionados utilizando imágenes satelitales dependió en gran medida, de la intensidad de los procesos de erosión y de los cambios correspondientes en la característica espectral de los suelos erosionados. Además, es importante señalar que la información provista por las imágenes satelitales no se limitó al mapeo de las áreas descubiertas por la vegetación, si no que a través de los índices de vegetación, como técnica de inferencia, pudo vincularse la erosión del suelo como lo indican los trabajos de investigación de Hochschild *et al.*, (2003) y Seutloali *et al.*, (2016), los cuales hacen hincapié en las propiedades ópticas de la superficie del suelo que pueden utilizarse como indicadores de la erosión y la delimitación de áreas escasamente cubiertas por vegetación en entornos semiáridos, y que en esta investigación presentan características similares semidesérticas por lo cual se utilizó el porcentaje de cubierta vegetal, para determinar las características de las superficies erosionadas, caracterizando los procesos y niveles de erosión y su distribución espacial, a través del procesamiento, clasificación e interpretación de una imagen satelital Landsat 8 OLI.

En regiones semi áridas, como en la región sur de la presa de Valsequillo la distribución de recursos financieros son escasos para la conservación y restauración del suelo, así como el desarrollo de políticas y regulaciones, por lo que se requiere una evaluación a nivel regional de la erosión del suelo para destinar recursos a áreas prioritarias. Además, la información espacial sobre la erosión del suelo sigue siendo un desafío, especialmente en México (INEGI, 2015). Debido al hecho de que los datos de erosión se limitan a grandes áreas por lo regular a escalas 1:250,000, y además la utilización diversas metodologías, lo cual proporciona una gran cantidad de conjuntos de datos de entrada para la monitorización de la pérdida de suelo que a veces no son adecuados para escalas locales. Por esta razón, esta investigación es una propuesta metodológica para la caracterización de las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla, que permitió describir los factores que controlan la erosión del suelo a partir de variables cualitativas, modelando el grado de erosión en función del relieve, el grado de pendiente y la profundidad del suelo mostrando la interrelación con las condiciones del entorno y que ofreció información adecuada, precisa y actualizada de la erosión del suelo a escala regional para realizar estudios de conservación, protección y restauración del suelo y además que sea una herramienta integradora entre la sociedad, el investigador y el gobierno.

Los resultados de la caracterización de las coberturas edáficas muestran la magnitud y la intensidad de los procesos erosivos. A partir de la clasificación se determinaron cinco coberturas edáficas las cuales se describen a continuación; La cobertura edáfica muy severamente degradada tiene la mayor extensión, lo que da lugar a grandes limitaciones para el uso de este recurso en estas áreas; téngase en cuenta que la categoría muy severa se considera cuando ya prácticamente todo el suelo se ha perdido y la roca aflora en la superficie, mientras que, las coberturas edáficas ligera y moderadamente degradada se observan en menor extensión, y son en estas áreas donde la vegetación, cultivos y pastizales presentan mejores condiciones, no obstante es necesario implementar medidas de uso y manejo para preservar las áreas con cultivos y para la conservación, protección y restauración del suelo, evitando que se continúe con la degradación, que ocurren en estas coberturas pero de manera más lenta, y que reviste mucha importancia hidrológica regional y para la conservación de suelos.

Esta representación geográfica de las áreas erosionadas coincide en gran medida con la distribución observada en el mapa erosión de los suelos en el municipio de Tzicaltacoyan (Ruiz *et*

al., 2013). En este caso, las áreas erosionadas no coinciden con las de mayor pendiente, pues los procesos erosivos están muy influenciados por la actividad humana al cultivar de forma extensiva e intensiva, sin la debida practica de medidas de conservación y manejo del suelo, lo cual provoca grandes pérdidas de suelo por arrastre en la época de lluvia aun en pendientes moderadas (Ruiz *et al.*, 2013). Esto es evidente en el área de estudio ya que las áreas erosionadas no solo se encuentran en las partes planas, sino también, en las laderas, presentándose coberturas edáficas muy severamente degradadas en áreas ligeramente onduladas. Este patrón de distribución de la erosión parece congruente con los patrones de cambio de uso del suelo, donde la mayor presión inicial se ejerce en las partes más accesibles; es decir, en las partes bajas de las laderas y cercanas a los núcleos urbanos, avanzando gradualmente hacia las partes media y altas de las laderas, y alejadas de las poblaciones provocando la aceleración de la erosión del suelo.

La **Tabla 25** muestran los resultados de la distribución espacial de las diferentes coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, se puede observar que el área de estudio está sujeta a diferentes procesos de erosión que van de ligeros a muy severos. Por ejemplo, la cobertura edáfica muy severamente degradada es la dominante con 1041 ha, es decir, el 33.52 % del área de estudio, que de acuerdo con los criterios establecidos para esta investigación corresponden a suelos con pérdida completa de todos los horizontes edáficos. En cuanto a las coberturas edáficas muy severamente degradada se encuentran muy extendidas en el contorno I y III, respecto al contorno I comprende un área de 487.85 ha, es decir un 66.68 %, y el contorno III, comprende un área de 253.7 ha, es decir, 31.99 % juntas comprende dos tercios del área de estudio, es decir 67.97 %, estas coberturas presentan suelos de poca profundidad, que coinciden con las áreas donde se ha causado la mayor degradación del suelo al eliminar la vegetación y cultivar las laderas sin prácticas de uso y manejo del suelo. En cuanto a las áreas con una cobertura edáfica ligeramente y moderadamente degradada, son evidentes que tiene mayor superficie en el Contorno II. En cuanto la cobertura edáfica ligeramente degradada en el contorno I, comprende un área de 26.6 ha (3.64 %) y moderadamente degradada 41.39 ha (5.66 %), en este contorno representan áreas aisladas que aún mantienen una vegetación arbustiva secundaria que protege al suelo de los procesos erosivos y que muestran los restos de la riqueza edáfica que dominaba en esta región. Aunque, no presentan un sotobosque denso que proteja el suelo, si se desarrolla un pasto bajo que se extiende por gran parte de este contorno que protege al suelo y le da soporte evitando que se siga

erosionando, es importante tomar medidas de protección de suelo y restauración para coberturas más pequeñas los otros dos contornos solamente ocupan en menor superficie.

Tabla 25. Calculo de áreas de las coberturas edáficas en los tres contornos.

Cobertura edáfica	Contorno I		Contorno II		Contorno II		Área total	
	Área		Área		Área		Área total	
	ha	%	ha	%	ha	%	Ha	%
Ligeramente degradada	26.6	3.64	373.3	23.62	33.24	4.19	433.35	13.95
Moderadamente degradada	41.39	5.66	401.47	25.4	92.72	11.69	535.84	17.25
Fuertemente degradada	75.24	10.28	298.41	18.88	229.58	28.95	603.81	19.43
Severamente degradada	100.5	13.74	207.98	13.16	183.76	23.17	492.64	15.86
Muy severamente degradada	487.85	66.68	299.18	18.93	253.7	31.99	1041.5	33.52
Total	731.58	100	1580.34	100	793	100	3107.14	100

Fuente. Elaboración propia.

Se procedió a calcular las superficies correspondientes a cada cobertura edáfica, cuyos resultados se muestran en la **Figura 11**.

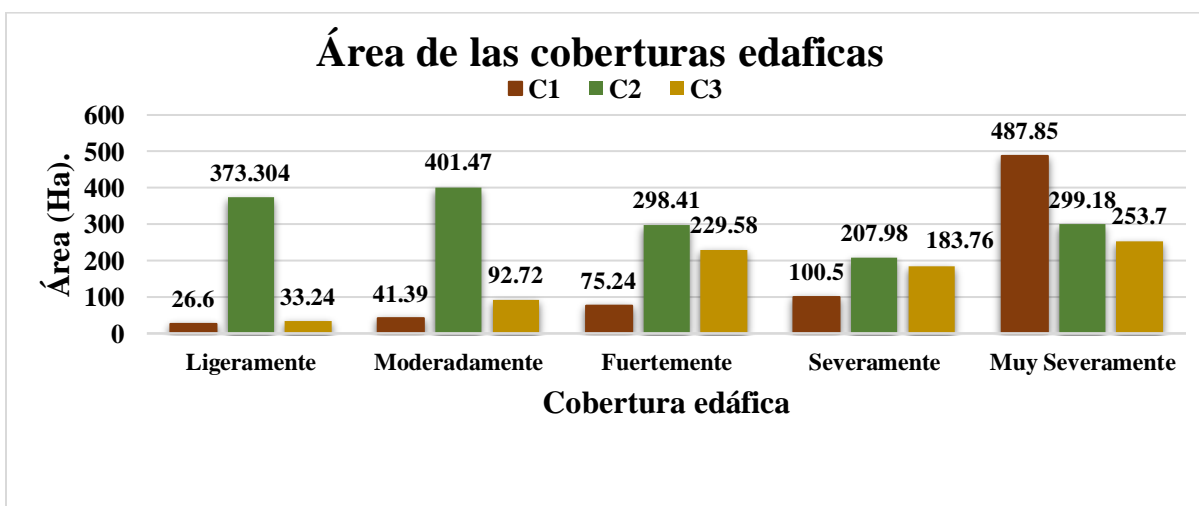


Figura 11. Cálculo de las superficies de Las coberturas edáficas en los diferentes contornos. Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, en menor porcentaje las coberturas edáficas ligeramente y moderadamente degradada comprende un área de 33.24 ha (4.19 %) y 92.72 ha (11.69 %) respectivamente en el contorno III. Estas coberturas están asociada a suelos fértiles, profundos con buen desarrollo de los horizontes edáficos. Sin embargo, estas áreas presentan una influencia humana fuerte por estar cerca de las localidades. Además, si no se aplican medidas de manejo y conservación, se pueden perder las funciones ecosistémicas que, aunque sean mínimas aun representan la resiliencia del sistema. En el contorno II, las coberturas edáficas ligeramente 373.30 ha (23.62 %) y moderadamente degradadas 401.47 ha (25.40 %) comprenden el 59.02 % del contorno II, es importante tomar en cuenta que el contorno II tiene el doble de superficie que los contorno I y II, gran parte de este contorno mantiene áreas conservadas, con baja influencia humana, esto representa el grado de conservación en cuestión de este contorno y se caracteriza por presentan suelos profundos que mantienen todos sus horizontes edáficos, o bien, que presentan un horizonte superficial en formación, y un porcentaje alto en vegetación. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta el relieve que predomina en este contorno, y poner especial atención a estas áreas, dado que en general se encuentran cubiertas por vegetación. En cuanto a las coberturas edáficas fuertemente y severamente degradadas tienen una menor superficie en el área de estudio, debido a que estas coberturas se encuentran asociada a cultivos de temporal cuya dinámica de erosión es diferente de las áreas con una cubierta vegetal denso. Presentan factores limitantes que determinan la vocación de los suelos y el manejo a que deben ser sometidos. En el contorno I, la cobertura edáfica fuertemente y severamente degradadas tiene una superficie de 75.24 ha (10.28 %) y 100.5 ha (13.74 %) respectivamente, están representadas por suelos de baja profundidad que han perdido el horizonte A y parte del B, y en ocasiones se encuentra aflorando el horizonte C. Por el otro lado, en el contorno II, las coberturas edáficas fuertemente de 298.41 ha (18.88 %) y muy severamente degradadas de 299.18 ha (18.93 %) representan una superficie de 37.7 %, esto muestra el impacto que han tenido las actividades humanas sobre el entorno. Es importante mencionar que si no se mantiene prácticas de recuperación de suelo y conservación se perderán los horizontes superficiales del suelo. En cuanto al contorno III, la cobertura edáfica fuertemente degradada, es la segunda más extensa con 229.58 ha (28.95 %), presenta suelos medianamente profundos, ocupados por áreas agrícolas por lo que son áreas que necesitan mayor atención en la implementación de prácticas de manejo y conservación, si se quiere lograr un manejo sustentable

de tierras y se quiere evitar que se continúe perdiendo los horizontes superficiales del suelo más productivos son sostén de la agricultura de subsistencia de la población.

CONCLUSIONES.

- La caracterización de las coberturas edáficas en la región sur de la presa de Valsequillo, Puebla, permitió conocer la magnitud, intensidad y distribución de los diferentes procesos y niveles de erosión del suelo que han provocado la pérdida de los horizontes edáficos más superficiales de unidades de suelos Phaeozem, Calcisol, Cambisol que dieron origen a unidades taxonómicas homogéneas como los Leptosoles con profundidades en algunas áreas de 10 a 20 cm, ya que a través de las metodologías tradicionales como en el caso de la descripción de perfiles de suelo son ineficientes debido a la alta degradación de los suelos y las condiciones semidesérticas que se presentan en el área de estudio.
- Se clasificaron cinco coberturas edáficas de acuerdo con los indicadores de erosión y factores ambientales que condicionan la erosión del suelo. El factor más importante que ha incidido es la actividad humana, a través de la cual se ha degradado la cobertura edáfica y vegetal, en condiciones topográficas desfavorables.
- Los suelos de la cobertura edáfica presentan un avanzado estado de degradación, lo que refleja en el hecho de que la cobertura edáfica muy severamente degradada es la más extensa con un área de 1024 ha en toda el área de estudio.
- Las propuestas de uso y manejo a partir de las coberturas edáficas sirvieron para la planificación de medidas de uso y manejo, protección, restauración y de áreas degradadas por la erosión del suelo.
- Con los análisis estadísticos se validó que existe una correlación estadísticamente significativa de que existe diferencia significativa entre la media de cada una de las coberturas edáficas y que existe relación de dependencia entre los contornos y las coberturas edáficas.
- El NDVI y el FVC con comprobación en campo son indicadores adecuados para determinar los cambios en las coberturas edáficas provocados por la erosión del suelo.
- El Mapeo y monitoreo de la magnitud y distribución espacial de la erosión del suelo es, por lo tanto, una tarea técnica importante si se quiere lograr un manejo sostenible de la tierra. Por lo tanto, es crucial tener información espacial actualizada sobre la magnitud y el alcance de la erosión del suelo para la planificación de programas de conservación del suelo y la rehabilitación de la tierra.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda continuar con la caracterización de las coberturas edáficas en otras áreas de estudio para validar la información, además de la integración de tecnologías de detección remota satelital como imágenes de mayor resolución para la investigación de la erosión del suelo a escala local para prácticas de conservación y rehabilitación del suelo.
- Se recomienda el empleo de la caracterización de las coberturas edáficas para programar medidas de conservación, uso y manejo, protección y restauración del suelo.

BIBLIOGRAFÍA.

- AFES (2008). Référentiel pédologique. France, Éditions Quæ Versailles.
- Aguirre-Díaz, G. (1997). Volcanic stratigraphy 01 the Amealco Caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (13), 10-51.
- Alatorre, L y Beguería, S. (2009). Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees. *Catena* (76), 182–190.
- Arroyo, I. (2017). Impacto de los procesos erosivos sobre las características y propiedades de los suelos en la región sur de Valsequillo, Puebla. TESIS (Maestría).
- Ascanio, O., Riverol, M. y Pérez, J. M. (1983). Antecedentes históricos de la erosión como fenómeno de empobrecimiento de los suelos cubanos. Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, (Reporte de Investigación No. 8), 13pp.P
- Aydda, A., Ah, A., Ab, A., Essemani, M., Taghya, Y. (2014). A new method to determine eroded areas in arid environment using Landsat satellite imagery. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 012021 (IOP Publishing).
- Baize, D., (1986). Couvertures pedologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol*, 4(3), 227-243.
- Belobrov, V., Marrero, A., Fuerol, M., Castro, N. y Marzhi, R. (1979). Instrucciones metodológicas para la cartografía de los suelos de Cuba. Academia de Ciencias. Cuba, Instituto de suelos, La Habana, 58 pp.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). Principles of Soil Conservation and Management, Springer Science +Business Media B.V. 126 pp.
- Bocquier, G., (1973). Genése et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. [S. l.]: ORSTOM. 325 p. (Mem. ORSTOM, 62).
- Boettinger, J.L., Ramsey, R.D., Bodily, J.M., Cole, N.J., Kienast-Brown, S., Nield, S.J., Saunders, A.M., Stum, A.K. (2008). Landsat spectral data for digital soil mapping. In: Hartemink, A.E., McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L. (Eds.), Digital Soil Mapping with Limited Data. Springer Science, Australia, pp. 193–203.

- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V... Panagos P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(2013).
- Boulaine, J., (1978). *Projet de taxonomie pédologique. Tome I.* Grignon: Multicopie. 20 pp.
- Boulet, R., (1974). *Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta. Équilibre et déséquilibre pedobioclimatique.* Tese - Université de Strasburg Paris. 272 p.
- CIEMAD (2010). *Memoria del Estudio Técnico Justificativo para la Declaratoria de Área Natural Protegida a la Sierra del Tentzo.* El Centro de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Anexo 2. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Delegación Puebla.
- Chávez, P.S., Jr. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036 pp.
- .
- Chauvel, A. (1977). *Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques de la zone tropicale à saisons contrastées.* Tese Université de Strasburg. Paris. 532 p.
- Chuvienco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*, 3ra. ed., Ed RIALP, Madrid, España.
- Chuvienco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación en la tierra desde el espacio*, Barcelona: Ariel ciencias.
- Cole, N.J., y Boettinger, J.L. (2007). A pedogenic understanding raster classification methodology for mapping soils, Powder River Basin, Wyoming, USA. In: P. Lagacherie, A.B. McBratney and M. Voltz (eds.), *Digital Soil Mapping: An introductory perspective.* *Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam, (31), 377–388.
- CONAFOR-UACH (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final.* Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma de Chapingo. Zapopan. Jalisco.

CONAGUA. (2009). Estadísticas del Agua 2008: Región Hidrológico Administrativa IV, Balsas. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

CONAPO. Consejo Nacional de Población. Consultado el 10 de octubre del 2018. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>

Comisión de las Comunidades Europeas (2002). Comunicación de la comisión al consejo, al parlamento europeo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Bruselas, 16.4.2002 COM (2002) 179 final. Consultado 1 de mayo de 2018. Disponible en <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231&fro=EN>.

Comisión de las Comunidades Europeas (2006). Comunicación de la comisión al consejo, al parlamento europeo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Estrategia temática para la protección del suelo. Bruselas, 22.9.2006 COM (2006) 231 final. Consultado 1 de mayo de 2018. Disponible en <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52002DC0179&fro=EN>.

CNDI (2010). Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. Sistema de Indicadores sobre la población indígena de México con base en: INEGI, Censo General de Población y Vivienda, México. 2010. Consultado 12 de junio del 2017. Disponible en www.cdi.gob.mx

Crutzen, P.J. (2002). Geology of mankind. *Nature*. 415:23.

De Asis, A.M., Omasa, K. (2007). Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of land sat ETMdata. *ISPRS J. Photo Gramme. Remote Sens*, (62) 309–324.

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología*, (2), 172-187.

Descroix, L., Viramontes D., Vauclin M., Barrios J. y Esteves M. (2001). Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico) *Catena*, 43(2001), 115-135.

DGSF (1981). Instructivo técnico para la confección del mapa de grados de erosión 1:250000 de las provincias. Dirección general de suelos y fertilizantes, Ministerio de la agricultura, 30 pp.

- DOF. (2010). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la región hidrológica Número 18 Balsas, México. Diario Oficial de la Federación. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5175730 (accessed on 3 October 2017).
- DOF. (2011). Declaratoria de Clasificación de Los Río Atoyac, Xochiac o Hueyapan, y Sus Afluentes. México. Diario Oficial de la Federación. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5199672&fecha=06/07/2011. Consultado el 22 de Marzo del 2017.
- Dokuchaev, V. V. (1895). On the Question of Opening Departments of Soil Science and the Science of Microorganisms (Particularly Bacteriology) in the Imperial Russian Universities. St. Petersburg, *Journal of the History of Biology* 39(2), 373-406.
- Dokuchaev, V.V. (1989). La contribución a la teoría de las zonas naturales: zonas edáficas horizontales y verticales. St Petersburgo. (En ruso [Dokuchaev, V.V. 1967. Selected Works of V.V. Dokuchaev. Traslated from russian by N. Kaner, Israel Program of scientific Translation, Jerusalem).
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69(9), 1858–1868.
- Dosso M. y Ruellan A. (1993). La couverture pédologique: histoire de sa découverte; actualité de son exploration (Soil cover: an history of its discovery, present aspects of its exploration). In: Bulletin de l'Association de géographes français, 70e année, 1 (mars). Morphogénèse et pédogénèse. Communications de l'étranger. 77-85 pp.
- Dudal, R. (2005). The sixth factor of soil formation. *Eurasian Soils Science*, 38(60), 65 pp.
- Estrada-Berg, J.W., Ortiz, C.A. (1982). Plano de erosión hídrica del suelo en México. Su representación: Escala 1:8000000, obtenido por la metodología FAO 1979. *Revista Geografía Agrícola* (3), 23-27.
- Eroglu, H., Cakir, G., Sivrikaya, F., Akay, A.E. (2010). Using high resolution images and elevation data in classifying erosion risks of bare soil areas in the Hatila Valley Natural Protected Area, Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, (24),699–704.
- Exelis Visual Information Solutions, “ENVI 5.3.1,” 2010, Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado. Consultada 4 agosto del 2017). <http://harrisgeospatial.com/ProductsandTechnology/Software/ENVI.aspx>.
- FAO-UNEP-UNESCO (1979). A provisional methodology for soil degradation assessment. Roma.

- Febles, J. M., et al., (1985). Limitaciones objetivas del perfil patrón” como índice diagnóstico para evaluar la intensidad de erosión en cuba. En: Memorias, tercera Jornada Científica del Instituto de Suelos. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, pp.227-232.
- Febles, J. M., Vega, M., Bóveda, M.M., Jerez, L. (2007). Experiencias en la aplicación de indicadores de sostenibilidad agroecológica en comunidades agrícolas de Ibero América. Memorias, del congreso de agroecología e agricultura ecológica en Galiza. ISBN 978-84-690-4156-7.
- Fernández, B. (1985). Análise estrutural e cartográfica detalhada de solos em Marília, Estado de São Paulo: ensaio metodológico. São Paulo. Dissertação (MESTRADO) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia. 146 p.
- Ferrari, L. (2014). Tectónica y volcanismo en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Consultada el 24 de marzo del 2018. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/260383955_Tectonica_y_volcanismo_en_el_Cinturon_Volcanico_Trans-Mexicano.
- Fridland V.M. (1974). Structure of the soil mantle. *Geoderma*, (12), 343-354.
- Fulajtar, E., (2001). Identification of severely eroded soils from remote sensing data tested in Risnovce, Slovakia. In: D.E., Stott, R.H., Mohtar and G.C., Steinhardt (Eds.), *Sustaining the Global Farm*. 1075–1081.
- García, E. (1989). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía (6). Universidad Autónoma de México.
- García, L. R. (1983). Diagnóstico sobre el estado de actual de la erosión en México. *Terra* 1.11-14.
- García, T. (2016). “Propuesta de restauración del recurso suelo en la comunidad de Tepenene”. TESIS (Maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México, 169 pp.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñoz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg. 176 pp.

- Hernández, A., Herrera, L. M., Iznaga, E., Tatevosian, G. S. (1980). La erosión en los suelos Pardos con Carbonatos (Pardos con Carbonatos) de Cuba”. *Ciencias de la Agricultura*, (5), 39-50.
- Hochschild, V., Marker, M., Rodolfi, G., Staudenrausch, H. (2003). Delineation of erosion classes in semi-arid southern African grasslands using vegetation indices from optical remote sensing data. *Hydrol. Process.* (17), 917-918.
- Hu, Y., Ban, Y., Zhang, X., Liu, J., Zhuang, D. (2008). “Spatial- temporal pattern of GIMMS NDVI and its dynamics in Mongolian Plateau”, In *IEEE Proceeding on earth observation and remote sensing applications*, pp.1-6.
- Humbel, F.X. (1978). Caracterisation par desmesures physiques, hydriques et d'enracinement de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle. *Science du Sol*, n. 2, p. 83-94.
- IBM Corp. Released 2015. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0*. Armonk, NY: IBM Corp.
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Consultada el 15 de abril de 2018, <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html>.
- INEGI. (2014). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2013*. México: INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. Carta Topográfica E14B15 San Francisco Teotihuacán. Formato vectorial, Esc. 1:50000. INEGI. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Consultada el 29 de noviembre del 2017, Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas>.
- INEGI. (2006). Carta Edafológica, Esc. 1:250000. INEGI. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. (2009). *Anuario estadístico y Geográfico del Municipio de Tzicatlacoyan*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. (2010). *Censo de Población y vivienda 2010. Principales resultados por Localidad ITER*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Consultada el 15 de noviembre del 2017, Recuperado de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc>.

INEGI. (2013). Carta vegetación y uso de suelo, Esc. 1:250000. INEGI. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI. (2014). Erosión de suelos en México, escala 1: 250 000. Boletín de prensa Núm. 295/14 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI. (2015a). Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre): datos nacionales. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. Consultada el 13 de abril del 2016, Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/suelo0.pdf>.

INEGI. (2015b). Guía para la interpretación de cartografía: uso de suelo y vegetación, Esc. 1:250000, serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI. (2017). Instituto Nacional de Estadística y Geografía Marco Geoestadístico Nacional. INEGI. México. Consultada el 13 de abril del 2016. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463142683>.

Instituto de Suelos (1971). Mapa Genético de Suelos de Cuba a escala 1:250,000. Instituto de Suelos, ACC, La Habana. ITC, 1979: Terrain analysis and classification using aerial photographs. Textbook of Photointerpretation. Vol VII. Enschede, Holanda, 320 pp.

IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Jenny, H. (1941). Factor of soil formation: a system of quantitative pedology. Mc Graw Hill, New York.

Jensen, J. R. 2005. Introductory Digital Image Processing (3rd edition). Prentice Hall.

Jiang, Z., Huete, A.R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. Remote Sens. Environ. (101), 366–378.

Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.,... Fresco, L.O. (2016). FORUM paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGs). Soil Discuss. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-2015-88>.

Kellogg, C.E., (1938). Recent trends in soil classification. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, (3) 253-259.

Lal, R. (2014). Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(3), 36-47.

Lal, R. (2018). Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil and Tillage Research*.

Lareshin, V. y Golovchenko, I. (1974). “Significados de las medidas de conservación de los suelos” Inedito, DGSE INRA. Isla de Pinos.

Le Roux, J.J., Newby, T., Sumner, P., (2007). Monitoring soil erosion in South Africa at a regional scale: review and recommendations. *South Afr. J. Sci.* (103), 329–335.

Lillesand T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004). Remote Sensing and Image Interpretation. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Luleva, M.I., van de Werff, H., van der Meer, F., Jetten, V. (2012). Gaps and opportunities in the use of remote sensing for soil erosion assessment. *Chem.: Bulg. J. Sci. Educ.* 21(5), 748–764.

Martínez, E., Rodríguez, P.F., Shruti, V.C., Sujitha, S., Morales, S., Muñoz, N. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: Multivariate approach. *Environ. Earth Sci.* (76),1–15. Consultada el 23 de febrero del 2017, Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-017-6406-2>.

McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L, Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, (117), 3 – 52.

MEA. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington DC.

Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environ. Model. Softw.* (18), 761–799.

Merwan, A, Balevb, S., Dutotb, A., Olivierb, D. (2014). A Model of Road Network and Buildings Extension Co-Evolution Agent-based Modeling and Simulation of Cities *Procedia Computer Science*”, 32, pp. 828 – 833.

- Milne, G. (1935). Some suggested unit's classification mapping particularly for east Africa soils. *Soils Res.* 4:183-198.
- MINAGRI (1982). Rivelos Metodología provisional para evaluar la degradación de los suelos. Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios, Ministerio de la Agricultura, (Informe). 26 pp.
- Montgomery, D.R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 13268e13272.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. (1990). World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory note. ISRIC/ UNEP. The Netherlands.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. 2. ed. Wageningen: ISRIC.
- Pedro, G. (1989). L` aproche spatiale en pédologie, Fondement de la connaissance des sols dans le milieu natural Réflexions liminaires, *Science du sols*, 27(4), 287-300.
- Pickup, G., Nelson, D.J. (1984). Use of Landsat radiance parameters to distinguish soil erosion, stability and deposition in arid central Australia. *Remote Sens. Environ.* 16(3), 195–209.
- Pimentel, D. (2006). "Soil erosion: A food and environmental threat". *Journal of the Environment, Development and Sustainability*, 8, 119-137.
- Pimentel, D., y Burgess, M., (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture*, (3), 443-463.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Reguero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi- Prensa, Madrid, 849 pp.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R.M. (2013). Edafología: uso y protección de suelos. 3º edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 608 pp.
- Price, K.P., 1993. Detection of soil erosion within pinyon-juniper woodlands using Thematic Mapper (TM) data. *Remote Sens. Environ.* 45 (3), 233–248.

Quantum GIS Development Team, (2017). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

Riverol, M. (1985). La erosión potencial de los suelos de Cuba y los métodos para su mapificación. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, Facultad de Agronomía, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez " Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana. 130 pp.

Riverol, M. (1989). Mapa de erosión actual a escala 1:2 000 000 En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba Instituto de Geografía de la ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Riverol, M., y. Shepashenko, G. (1989). Mapa de erosión potencial a escala 1: 200,000. En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba Instituto de Geografía de la ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Ruellan, A., Dosso, M., Fritsch, E. (1989). L'analyse structurale de la couverture pédologique. *Science du Sol*, (27)319-334.

Ruiz, C.J., Calderón E., Tamariz, V. (1999). "Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno". Textos BUAP. Puebla, México. 65 pp.

Ruiz, C. J., Riverol, R. M., Castelán, V. R., Torres, T. E., Martínez, R. F. (2004a). Factores que determinan la erosión de los suelos. En J. Ruíz, Careaga, Mario, R. T., Rosalía, C. V., Edgardo, T. T., Francisco, M. R. (Ed). *Manejo y conservación de los suelos en minifundios de la Sierra Norte de Puebla*. (63 – 77). México, Dirección General de Fomento Editorial, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla e Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura de Cuba.

Ruiz, C. J., Riverol, R. M., Castelán, V. R., Torres, T. E., Martínez, R. F. (2004b). Diagnóstico de la erosión de los suelos. En J. Ruíz, Careaga, Mario, R. T., Rosalía, C. V., Edgardo, T. T., Francisco, M. R. (Ed). *Manejo y conservación de los suelos en minifundios de la Sierra Norte de Puebla*. (79 – 101). México, Dirección General de Fomento Editorial, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla e Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura de Cuba.

Ruiz, C. J., Riverol, R. M., Tamariz, F. V., Castelán, V. R. (2005). Zonificación agroecológica de la Sierra Norte de Puebla. Francisco, M. R., Eduardo. C. F., Luis, R. R (Col). México, Dirección General de Fomento Editorial, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla e Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura de Cuba. 196 pp.

Ruiz, C.J., Tamariz, V., Castelán, R. y Calderón F. E. (2013). Los suelos del Municipio Tzicatlacoyan. Factores que provocan su degradación. En: Ciencias Ambientales. Temáticas para el Desarrollo. Volumen III. Eds. J. Ruiz Careaga, R. Castelán Vega, V. Tamariz Flores y M. A. Hernández. Fomento editorial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. 35-44 pp.

Santos, J. (2000). Structural analysis contribution of the pedological cover to the soil science development. Editora da UFPR. R. RA'EGA, *Curitiba*, (4),131-138 pp.

SEMARNAT y Colegio de Postgraduados. (2003). Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250 000, México 2001-2002.

SEMARNAT (2015). Programa Nacional Manejo Sustentable de Tierras: Para combatir Degradación de Tierras y Desertificación en México. Sistema Nacional de lucha contra la Desertificación y la Degradación de Recursos Naturales (SINADES). Disponible en <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-nacional-manejo-sustentable-de-tierras>.

SGM. (2017). Carta geológica-minera San Francisco Teotihuacán E14B53, Esc. 1:50000. Servicio Geológico Mexicano. Consultada el 11 de noviembre de 2017. Recuperado de http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1820_E14-B53_GM.pdf.

Shepashenko, G., Riverol, M., Hernández, A. (1982). "Resistencia anti erosiva de los principales suelos agrícolas de Cuba". *Cien. Agric., Academia de Ciencia de Cuba*, (16), 105-118 pp.

Shepashenko, G., Riverol, M., Calzada, N. (1984). La erosión hídrica y los métodos de combatirla en los países en vías de desarrollo con clima tropical y subtropical y subtropical. Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, (Reporte de Investigación. No.10) 40 pp.

SMN (2017). Servicio Meteorológico Nacional Normales Climatológicas periodo 1946- 2015. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>.

Sepuru, T. y Dube, T. (2018). An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (9), 1–9 pp.

Seutloali, K.E., Dube, T., Mutanga, O. (2016). Assessing and mapping the severity of soil erosion using the 30-m Landsat multispectral satellite data in the former South African homelands of Transkei (viewed 06 June 2017). *Phys. Chem. Earth*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.001>.

Soca, M. T. (1987). Diagnóstico y características de los principales suelos erosionados de las regiones agrícolas de Cuba. Instituto de Suelos, MINAGRI, La Habana, TESIS (Doctoral), 110 pp.

Sibello, R. Y. (2013). Determinación del impacto de los suelos usando Cesio-137 como radio trazador. Tesis para optar por el título en Máster en Ciencias en Ingeniería en Saneamiento Ambiental. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba, 169 pp.

Sibirtsev, N.M. (1909). *Soil Science*. St. Petersburg, 2nd ed., XVI + 504 pp. (in Russian).

Shikhar D., Akansha S. (2014). “Urban Sprawl modeling using cellular automata”. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17, 179–18.

Soil Survey Staff (1951). *Soil survey manual*. USDA Handbook, 18.

Smith, P., Cotrufo, F. M., Rumpel, C., Paustrian, K., Kuikman, P. J., Elliot, J. A... Scholes, M. C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key of ecosystem services provide by soils. *Soil Discuss.*
Alejandro, M., Omasa, K. (2007). Estimation of vegetation parameter for modelling soil erosion using linear spectral mixture analysis of Landsat ETM data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, (62), 309-324. (2), 537 – 586.

Sposito, G. y Reginato R. (1992). *Opportunities in Basic Soil Science Research*. Wisconsin, Madison, SSSA. 109 pp.

Taruvunga, K. (2009). *Gully mapping using remote sensing: Case study in KwaZulu-Natal, South Africa* (master's thesis, University of Waterloo).

Tesfamichael, S.G. (2004). *Mapping potential soil erosion using RUSLE, Remote Sensing, and GIS: the case study of Weenen game reserve (Kwazulu-Natal. M.Sc. Dissertation)*. University of KwaZulu-Natal, South Africa.

Tucker, C. J. (1979). “Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation.” *Remote Sensing Environment* (8), 127–150.

USGS, Glovis. Consultada el 22 de mayo de 2017. Recuperado de <https://glovis.usgs.gov/next/>.

United Nations Sustainable Development Knowledge Platform. (2015). *Open working group proposal for sustainable development goals (SDG)*. Recuperado de <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1579SDGs%20Proposal.pdf>.

Silva, Y. (2017). “Indicadores edáficos para la alerta de erosión y desertificación al sur del municipio de Puebla”.

Van Lyden, G. W. y Oldeman L. R. (1997). *The assessment of the status of Human-induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD)*. Wageningen: ISRIC, FAO Y UNEP.

- Van Zuidam RA. 1985. Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC-Textbook VII-6, 2. Enschede.
- Vega, M. B. y Febles, J. M. (2011). La investigación de suelos erosionados: métodos e índices de diagnóstico. Consultada el 01 abril del 2018. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/51023064_La_investigacion_de_suelos_erosionados_metodos_e_indices_de_diagnostico.
- Viera, M.J. Cubero, D. Azofeita, R. (1996). Criterios de identificación y selección de opciones técnicas. Proyecto MAG/FAO/GOS. San José, Costa Rica. 43.
- Villota, H. (1992). El sistema CIAF de clasificación fisiográfica del terreno". *Revista CIAF*, 13(1), 55-70. Santa Fe de Bogotá.
- Wang, G., Gertner, G., Fang, S., Anderson, A. B. (2003). Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* (69), 889–898.
- Wen, Z., Lees, B.G., Jiao, F., Lei, W., Shi, H. (2010). Stratified vegetation cover index: a new way to assess vegetation impact on soil erosion. *CATENA* 83(1), 87–93.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., Uhland, R. E. (1958). Evaluation of factors in the soil-lossequation. *Agric. Eng.* (39), 458-462.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook No. 537. USDA. *Science and Education administration*.
- Xie, Y., Zhao, X., Li, L., Wang, H. (2010). Calculating NDVI for landsat7-etm data after atmospheric Correction using 6s model: a case study in Zhangye City, China, In proceeding IEEE Geo Informatics 18th international conference, 1-4 pp.
- Zeng, X., Dickinson, R.E., Walker, A., Shaikh, M., DeFries, R.S. y Qi, J. (2000). Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegetation cover data for land modeling. *Journal of Applied Meteorology* 39(6), 826–839.
- Zhan, Y., Meng, Q., Wang, C., Li, J., Zhou, K., & Li, D. (2014). Fractional vegetation cover estimation over large regions using GF-1 satellite data. Proceedings of the SPIE. Bellingham, WA: SPIE (pp. 92604B-92604B-92608, Beijing, China).